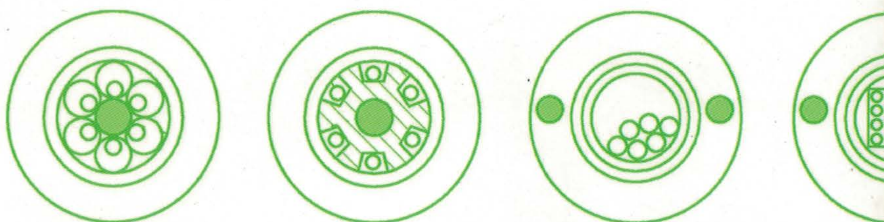
光纤通信入门130问



GUANGXIAN TONGXIN RUMEN 130 WEN

原荣 编著



这本书告诉你光纤通信并不神秘

初中以上文化程度的普通读者就能看得懂

带你了解3G/4G手机的工作原理、长途电话/广播电视的传输过程

告诉你光纤到家采用的技术





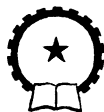
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

光纤通信入门 130 问

原 荣　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书就光纤通信的一些基本概念，以问答的方式，用通俗的语言进行了解释。

全书共分8章，第1章回顾了光纤通信的基础知识，第2、3章分别介绍了光纤通信的传输介质——光纤光缆和组成系统的光无源器件，第4～6章分别阐述了光纤通信系统光接收/发射和中继放大技术；第7章就光纤通信系统的主要技术进行了概述，第8章回答了在光接入网中人们经常会碰到的一些问题。

本书是一本初步了解光纤通信的入门读物和普及教材，适合具有初中文化以上水平的读者阅读；同时，对从事光纤通信系统和网络的研究教学、规划设计、管理和维护的有关人员也有一定的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

光纤通信入门130问/原荣编著．—北京：机械工业出版社，2012.4（2014.6重印）

ISBN 978-7-111-37800-6

Ⅰ. ①光…　Ⅱ. ①原…　Ⅲ. ①光纤通信－问题解答　Ⅳ. ①TN929. 11－44

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第049960号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：李馨馨　　责任编辑：李馨馨
版式设计：霍永明　　责任校对：肖　琳
封面设计：鞠　杨　　责任印制：乔　宇
三河市国英印务有限公司印刷
2014年6月第1版第2次印刷
140mm×203mm·5.375印张·161千字
3001—4800册
标准书号：ISBN 978-7-111-37800-6
定价：20.00　元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

前　　言

自 20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信技术的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟，光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

光纤通信应用范围不断扩大，已和人们的日常生活密不可分。目前，无论电信骨干网还是用户接入网，无论陆地通信网还是海底光缆网，无论看电视还是打电话，光纤无处不在，无时不用，光纤传输技术随时随地都能碰到。所以，光纤通信已不再是通信界、学术界和商界的事情；对于每个人，比如上网推销农副产品的农民，做小本生意的个体老板，在马路上用手机打电话的过往行人，在家里、车里看电视的人们，他们的一举一动都和光纤通信有关。所以，对于我们每个人，了解一点光纤通信的基本知识也是有必要的。

本书是在作者编著的《光纤通信》（第 3 版）、《宽带光接入技术》、《光纤通信技术》和《光纤通信网络》（第 2 版）等多本书的基础上，选取了光纤通信中最基本的和日常生活密切相关的知识和技术，以通俗易懂、简明扼要、图文并茂的方式进行了讲解，以便那些具有初中以上文化程度的普通读者也能够看懂。本书只需抽一丁点时间就能看完，读者也可在茶余饭后只找出自己感兴趣的问题来阅读。

全书共分 8 章，第 1 章回顾了光纤通信的基础知识，比如光的本质是什么？通信用的光源和太阳光有何不同？第 2、3 章分别介绍了光纤通信的传输介质——光纤光缆和组成系统的

光无源器件，从插入水中的筷子为什么向上弯曲引出光纤传光的原理；第4～6章分别阐述了光纤通信系统光接收/发射和中继放大技术；第7章就光纤通信系统的主要技术进行了概述，比如3G手机用到的码分复用（CDMA），4G手机用到的正交频分复用（OFDM），长途干线用到的波分复用（WDM），看电视用到的光纤同轴电缆混合网络（HFC）等；第8章回答了在光接入网中人们经常会碰到的一些问题，比如何谓三网融合、何谓EPON等。

原　荣
2011年12月16日于桂林
中国电子科技集团公司（CETC）第三十四研究所
（桂林激光通信研究所）

目　录

前言

第 1 章　光纤通信概述 ………………………… 1

1-1　什么叫光纤通信？ ………………………… 1

1-2　光是电磁波吗？激光器发出的光与太阳光有什么不同？ …… 1

1-3　光的本质是什么？ ………………………… 4

1-4　频率、波长和光速有什么关系？ ………………………… 6

1-5　模拟/数字信号的频率/比特率各用什么单位表示？ ………… 7

1-6　光在真空中传播和在玻璃中传播哪个快？ ………………… 8

1-7　古代用光传递信息吗？ ………………………… 8

1-8　谁发明了光电话？ ………………………… 9

1-9　谁发明了激光器？ ………………………… 10

1-10　谁是光纤通信的鼻祖？ ………………………… 10

1-11　光纤通信有哪些优点？ ………………………… 12

1-12　如何组成一个光纤通信系统？ ………………………… 13

第 2 章　光纤通信传输介质 ………………………… 15

2-1　光纤和光缆由什么物质组成？结构如何？ ………………… 15

2-2　插入水中的筷子为什么向上弯曲了？ ………………………… 16

2-3　水下的潜水员在什么位置看不到岸上的姑娘？何谓临界角？ ………………………… 16

2-4　当光波从折射率较大的介质以不同的入射角进入折射率较小的介质时会出现哪三种不同的情况？ ………………………… 17

2-5　光纤是怎样传光的？ ………………………… 18

2-6　什么是阶跃光纤？什么是渐变光纤？ ………………………… 19

2-7　为什么渐变多模光纤内的光线能同时到达输出端？ ………… 20

2-8　光线在单模光纤中传输为什么比在多模光纤中传输得快？ … 22

2-9　光纤是如何制造出来的？ ………………………… 23

2-10　光纤有损耗吗？ ………………………… 24

2-11　dBm 与 mW、μW 如何换算？ …… 25
2-12　如何用功率比表示 dB 值？ …… 25
2-13　光纤的损耗与波长有关吗？ …… 26
2-14　什么是色散？光纤色散是如何产生的？ …… 26
2-15　什么是模式色散？它是如何影响系统性能的？ …… 27
2-16　为什么渐变折射率多模光纤的色散比阶跃光纤的小？ …… 28
第 3 章　光纤通信器件 …… 30
3-1　什么是光纤连接器？什么是连接器跳线？ …… 30
3-2　什么是光耦合器？有哪几种光耦合器？ …… 31
3-3　什么是可调谐光滤波器？ …… 32
3-4　什么是干涉？如何构成法布里－珀罗（F-P）谐振腔？ …… 33
3-5　商用干涉滤波器的工作原理是什么？ …… 36
3-6　什么是 F-P 干涉仪？如何构成光纤 F-P 干涉仪 …… 37
3-7　什么是马赫－曾德尔（M-Z）滤波器？ …… 38
3-8　什么是介质薄膜光滤波解复用器？ …… 39
3-9　三角棱镜如何将太阳白光分解为七色光谱？ …… 41
3-10　什么是波分复用器？什么是波分解复用器？棱镜如何完成波分解复用？ …… 42
3-11　什么是阵列波导光栅（AWG）复用/解复用器？ …… 43
3-12　什么是光交换？ …… 44
3-13　什么是微机电系统（MEMS）光开关？ …… 45
第 4 章　光纤通信光发射机 …… 48
4-1　直接调制和外调制发射机有何不同？ …… 48
4-2　为什么半导体晶体能够发光？ …… 49
4-3　激光器（LD）和发光二极管（LED）有何不同？激光器和探测器有何本质区别？ …… 50
4-4　什么是相干光？什么是非相干光？ …… 51
4-5　LD 激光发射的条件是什么？ …… 54
4-6　LED 和 LD 的波长特性有何不同？ …… 56
4-7　什么是分布反馈（DFB）激光器 …… 57
4-8　什么是光的衍射？什么是衍射光栅？ …… 57
4-9　如何构成一个波长可调激光器？ …… 60
4-10　模拟强度光调制和数字强度光调制有何不同？ …… 61

第 5 章　光纤通信光接收机 …… 62
5-1　光接收机的作用是什么？ …… 62
5-2　光探测器的作用和原理是什么？ …… 62
5-3　什么是 PIN 光探测器？ …… 63
5-4　什么是雪崩光敏二极管（APD）？ …… 64
5-5　什么是波导光探测器（WG－PD）？ …… 65
5-6　数字光接收机主要由哪几部分组成？各有什么作用？ …… 67
5-7　为什么接收机前置放大器特别重要？ …… 68
5-8　光接收机中存在哪些噪声？什么是信噪比？ …… 68
5-9　什么是比特误码率（BER）？通常数字光接收机要求的 BER 是多少？接收机灵敏度的定义是什么？ …… 70
5-10　监测光纤通信系统性能好坏通常采用什么最直观、最简单的方法？ …… 70
5-11　什么是相干探测？为什么要用相干探测？ …… 71
第 6 章　光纤通信光中继放大器 …… 73
6-1　再生中继器的功能和缺点是什么？ …… 73
6-2　光放大中继器的作用是什么？ …… 73
6-3　什么是掺铒光纤放大器（EDFA）？ …… 74
6-4　如何构成一个 EDFA？ …… 74
6-5　EDFA 的工作原理是什么？ …… 75
6-6　EDFA 有哪些应用方式？ …… 76
6-7　EDFA 有几种泵浦方式？哪种方式转换效率高？哪种噪声系数小？ …… 77
6-8　EDFA 增益频谱特性如何？ …… 78
6-9　EDFA 级联需要考虑哪些问题？ …… 78
6-10　半导体光放大器（SOA）的工作原理是什么？ …… 79
6-11　如何使 LD 变为 SOA？ …… 81
6-12　什么是分布式拉曼放大器？有何应用？与 EDFA 比较有何不同？ …… 81
第 7 章　光纤通信系统 …… 84
7-1　为什么要将模拟信号变为数字信号？如何变为数字信号？ …… 84
7-2　有几种光复用技术？ …… 86
7-3　什么是波分复用（WDW）技术？ …… 87

7-4 WDM 系统有哪几种网络单元? …… 89
7-5 WDM 系统光线路终端(OLT)如何构成? …… 90
7-6 WDM 系统光分插复用器(OADM)如何构成? …… 91
7-7 WDM 系统光交叉连接器(OXC)如何构成? …… 92
7-8 WDM 系统光线路放大器(OLA)如何构成? …… 93
7-9 如何让光携带声音和数字信号? …… 93
7-10 光调制器如何分类? …… 95
7-11 最常用的外调制器是什么? …… 96
7-12 如何实现频分复用(FDM)和波分复用(WDM)? …… 97
7-13 时分复用(TDM)的基本原理是什么? …… 99
7-14 电视台送到各家各户的电视节目是采用何种复用技术?
3G 和 4G 手机信号和固定电话信号各采用何种复用技术? …… 101
7-15 SDH 如何将低速信号复用映射成高速信号? …… 102
7-16 不同等级的 STM-N 速率是多少?如何进行等级复用? …… 103
7-17 SDH 有哪几种传输终端设备?SDH 系统通常用什么
结构? …… 103
7-18 ATM 与 STM(SDH)有什么不同? …… 107
7-19 何谓 IP?提供什么服务?IP 进入光传送网有几种可能的
方式? …… 109
7-20 STM、ATM 和 IP 数据分组有何不同? …… 111
7-21 以太网如何接入互联网? …… 112
7-22 什么是多协议标记交换(MPLS)? …… 112
7-23 什么是通用多协议标记交换(GMPLS)? …… 114
7-24 什么是自动交换光网络(ASON)? …… 116
7-25 什么是光正交频分复用(O-OFDM)系统? …… 118
7-26 什么是网络生存性? …… 119
7-27 如何对 SDH 网络进行保护? …… 120
7-28 光纤通信系统按拓扑结构如何分类? …… 122
7-29 光纤通信网络按网径大小分成几类? …… 123
第 8 章 光接入网 …… 125
8-1 接入网在网络建设中有什么作用? …… 125
8-2 光接入网技术是怎样演进的? …… 125
8-3 什么是三网融合?为什么说它是接入网的发展趋势? …… 128

8-4　何谓无源光网络？目前有哪几种无源光网络？ …………… 129
8-5　下行复用采用哪几种技术？ ………………………………… 129
8-6　上行接入采用哪几种技术？3G 和 4G 移动通信网络各采用何种接入技术？ ………………………………………………… 130
8-7　为什么正交频分复用（OFDM）各副载波信号可以互不干扰而频谱利用率又高？ ……………………………………… 132
8-8　4G 移动通信还用到哪些关键技术？ ………………………… 133
8-9　时分多址接入（TDMA）是如何实现的？ ………………… 134
8-10　移动通信使用光纤传输吗？ ……………………………… 136
8-11　什么是 EPON？它与 APON 有什么不同？ ……………… 138
8-12　10 G EPON 如何与 1 G EPON 兼容？ …………………… 138
8-13　为什么 PON 系统上行方向均选用 1 260 ~ 1 360 nm 波长的发射机，而下行方向则选用 1 480 ~ 1 500 nm 波长的发射机？ ………………………………………………… 139
8-14　为什么要提出 GPON？ …………………………………… 139
8-15　GPON 与 EPON 比较有哪些优势？ ……………………… 140
8-16　GPON 有哪两种传输模式？为什么 GPON 能够支持实时业务？ ………………………………………………………… 141
8-17　为什么要提出 WDM-PON？ ……………………………… 142
8-18　如何构成波长固定 WDM-PON？ ………………………… 142
8-19　如何构成 ONU 波长可调 WDM-PON？ ………………… 143
8-20　如何构成 ONU 无色 WDM-PON ？ ……………………… 144
8-21　与 PS-PON 比较 WDM-PON 技术上有什么优点？ ………… 146
8-22　什么是 WDM/TDM 混合无源光网络？ …………………… 146
8-23　什么是正交频分复用 PON（OFDM-PON）？ …………… 147
8-24　什么是射频信号光纤传输（RoF）系统？ ………………… 149
8-25　如何将光正交频分复用（O-OFDM）技术应用到 RoF 无线通信网络中？ ………………………………………… 149
8-26　什么是光纤/电缆混合（HFC）网？ ……………………… 150
8-27　什么是 ADSL 接入？ ……………………………………… 155
8-28　如何将 SDH 用于接入网？ ………………………………… 157
8-29　什么是大气光通信传输系统？ …………………………… 158
附录 ……………………………………………………………… 160

第 1 章　光纤通信概述

1966 年，英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文，指出利用玻璃纤维进行信息传输的可能性和技术途径，从而奠定了光纤通信的基础。在此后短短的 40 多年中，光纤损耗由当时的 3 000 dB/km 已经降低到目前的 0.151 dB/km。在光纤损耗降低的同时，光纤通信用光源、探测器和无源/有源器件，无论是分立元件，还是集成器件都取得了突破性的进展。自 20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟，光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

目前，无论电信骨干网还是用户接入网，无论陆地通信网还是海底光缆网，无论看电视还是打电话，甚至网上购物、QQ 聊天、网上银行也都用到光纤通信。光纤无处不在，无时不用，光纤传输技术随时随地都能碰到。所以，了解光纤通信技术，不仅是通信界的事情，普通人员也很有必要。

本书就以通俗的语言对光纤通信的基础知识做一个介绍。

1-1　什么叫光纤通信？

光纤通信是利用人眼看不见的一种光线作为载体来传递打电话的声音、网上购物发出的订单、电视台传送的节目的一种通信。这种光线的频率比调频广播的频率高得多，但又比可见光的频率低一些，它的频率范围在 230 ~ 187 THz，1 THz 等于 10^{12} Hz；波长范围在 1.3 ~ 1.6 μm，1 μm = 10^{-6} m。我们看到的红光波长是 0.66 ~ 0.73 μm，紫光波长是 0.4 ~ 0.44 μm，而橙光、黄光、绿光、青光和蓝光的波长则在红光和紫光之间。

1-2　光是电磁波吗？激光器发出的光与太阳光有什么不同？

一提到光，人们会立刻联想到太阳光和电灯光。与收音机用的

无线电波一样，光也是一种电磁波，不过它的波长比无线电波的波长短得多，或者说，它的频率比无线电波高得多，如图1-1所示。太阳光和电灯光可以看做是波长在可见光范围内的电磁波的混合体。与此相反，光纤通信使用的激光器发出的光则是单色光，具有极窄的光谱宽度。点光源是只有几何位置而没有大小的光源。在自然界，理想的点光源是不存在的，但是对于均匀发光的小球体，如果它本身的大小和它到观察点的距离相比小得多，我们就可以近似地把它看做点光源。激光器发出的光也可以看做是点光源。光线是光向前传播的一条类似于几何线的直线。有一定关系的一些光线的集合叫光束。

光是一种电磁波，即由密切相关的电场和磁场交替变化形成的一种偏振横波，它是电波和磁波的结合。它的电场和磁场随时间不断地变化，分别用 E_x 和 H_y 表示，在空间沿着 z 方向并与 z 方向垂直向前传播，这种波称为行波，如图1-2所示。由于电磁感应，当磁场发生变化时，会产生与磁通量的变化成比例的电场；反过来，电场的变化也会产生相应的磁场。并且 E_x 和 H_y 总是相互正交传输。最简单的**行波**是正弦波，沿 z 方向传播的数学表达式为

$$E_x = E_o\cos(\omega t - kz + \phi_o) \tag{1-1}$$

式中，E_x 是时间 t 在 z 方向传输的电场；E_o 是波幅；ω 是角频率；k 是传输常数或波数，$k = 2\pi/\lambda$，这里 λ 是波长；ϕ_o 是相位常数。在 $t = 0$ 和 $z = 0$ 时，E_x 可以是零也可以不是零，这要由起点决定。$\omega t - kz + \phi_o$ 称为波的相位，用 ϕ 来表示。

由于时间和空间的关系，对于给定的相位 ϕ 对应的最大场，根据式（1-1），常数 ϕ 可用下式描述：

$$\phi = \omega t - kz + \phi_o \tag{1-2}$$

在时间间隔 δt 内，波前移动了 δz，因此该波的相速度是 $\delta z/\delta t$。于是相速度为

$$\upsilon = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \nu\lambda \tag{1-3}$$

式中，ν 是频率（$\omega = 2\pi\nu$），单位是赫兹（Hz），1 Hz 等于每秒振荡1周，两个相邻振荡波峰之间的时间间隔称为周期 T，等于光波频率的倒数，即 $\nu = 1/T$。

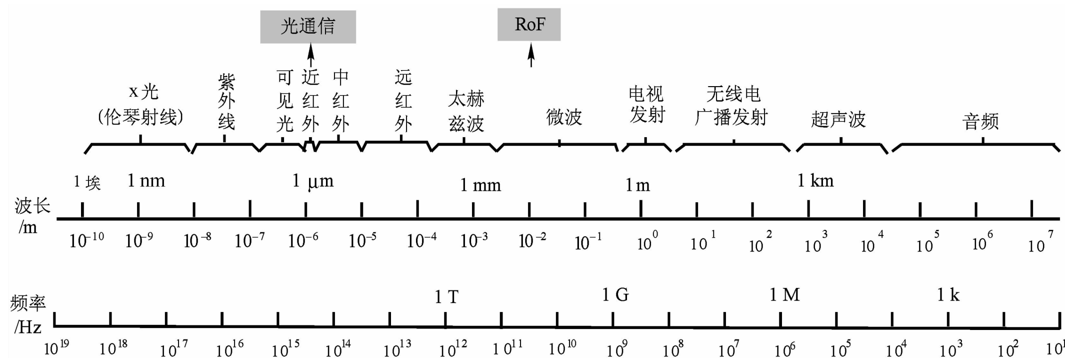


图 1-1　电磁波频率与波长的换算

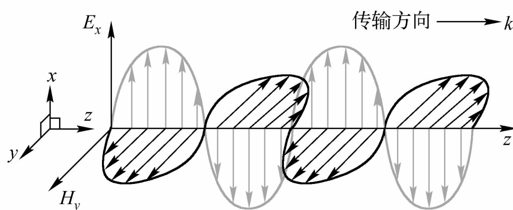


图 1-2 电磁波电场 E_x 和磁场 H_y 随时间不断变化，在空间沿着 z 方向总是相互正交传输

假如波沿着 z 方向依波矢量 $\boldsymbol{k}$ 传播，如式（1-1）所示，被 Δz 分开的两点间的相位差 $\Delta\phi$ 可用 $k\Delta z$ 简单表示，因为对于每一点 ωt 是相同的。假如相位差是 0 或 2π 的整数倍，则两个点是同相位，于是相位差 $\Delta\phi$ 可表示为

$$\Delta\phi = k\Delta z \qquad 或 \qquad \Delta\phi = \frac{2\pi\Delta z}{\lambda} \tag{1-4}$$

我们经常对光波上给定时间被一定的距离分开的两点间的相位差感兴趣，比如由马赫－曾德尔（M－Z）干涉仪构成的滤波器、复用/解复用器和调制器，由阵列波导光栅（AWG）构成的诸多器件（滤波器、波分复用/解复用器、光分插复用器和波长可调/多频激光器等），以及由电光效应制成的外调制器和由热光效应制成的热光开关等，它们的工作原理均用到相位差的概念，所以大家要特别给予关注，本书以后有关问题也会经常用到这一概念，并使用式（1-4）。

1867 年，麦克斯韦证实了光是一种电磁波，光的传播就是通过电场、磁场的状态随时间变化的规律表现出来的。他把这种变化列成了数学方程，后来人们就称它为麦克斯韦波动方程，这种统一电磁波的理论获得了极大的成功。

1-3 光的本质是什么？

光既是波又是粒子，具有两种特性，即波动性和粒子性。光在传播时，表现为波动性；光与物质作用时，表现为粒子性。

1. 光的波动性

1864 年，麦克斯韦（Maxwell）通过理论研究指出，和无线电波、x 射线一样，光是一种电磁波，光学现象实质上是一种电磁现象，光波就是一种频率很高的电磁波，光波是电磁波谱的一个组成部分，如图 1-1 所示。

1888 年，德国物理学家赫兹首先用人工的方法获得了电磁波，并且通过电谐振接收到它，这就证实了电磁波的实际存在。后来又通过实验发现，电磁波在金属表面上要反射，在金属凹面镜上反射后会聚焦，通过沥青棱镜时要发生折射等现象。从而证实了光波在本质上跟电磁波是一样的。

1891～1893 年，科学家们分别用实验的方法测出了电磁波的传播速度，它和光的传播速度近似相等。

利用光的波动性可解释光的反射、折射、衍射、干涉和衰减等特性。单频光称为单色光，在均匀介质中，可用麦克斯韦波动方程的弱导近似形式描述。

光波可以用频率（波长）、相位和传播速度来描述。频率是每秒传播的波数，波长是在介质或真空中传输一个波（波峰－波峰）的距离。频率用赫兹（Hz）、MHz、GHz 或 THz 表示，波长用微米（μm）或纳米（nm）表示。在日常生活中，把“光”定义为可用眼睛看见的辐射。图 1-3a 表示人的眼睛对各种波长辐射的相对灵敏度，由图可见，人眼对黄绿光最灵敏。

2. 光的粒子性

利用光的波动性可以解释很多现象，但是很多时候光的行为并不像一个波，而更像是由许多微粒组成的集合体，这种微粒称为光子，这种假设由爱因斯坦 1905 年首先提出。单色光的最小单位是光子，可用能量方程来描述，即

$$E = h\nu \qquad (1\text{-}5)$$

式中，h 是普朗克常数（$h = 4.136 \times 10^{-15}\,\text{eV}\cdot\text{s}$）；$\nu$ 是频率（单位为 Hz）。光子能量 E 与它的频率 ν 成正比，频率越高，能量越大。光子能量用电子伏特（eV）表示，1eV 就是一个电子电荷经过 1V 电位

差时，电场力所做的功。

像所有运动的粒子一样，光子与其他物质碰撞时也会产生光压。光也是一种能量的载体，当光子流打到物质表面上时，它不但要把能量传递给对方，也要把动量传递给对方，而且也遵守能量守恒定律和动量守恒定律。为了验证上述说法的正确性，可用图 1-3b 表示的实验装置进行实验。图中有一个抽成真空的玻璃容器，容器内装有阳极 A 和金属锌板的阴极 K。两个电极分别与电流计 G、伏特计 V 和电池组 B 连接。当光子照射到阴极 K 的金属表面上时，它的能量被金属中的电子全部吸收，如果光子的能量足够大，大到可以克服金属表面对电子的吸引力，电子就能跑出金属表面，在加速电场的作用下，向阳极 A 移动而形成电流。这种现象就叫做光电效应。实验表明，使用可见光照射时，不论光的强度多么大，照射时间多么久，电流计总是没有电流；但使用紫外光照射时，不论光的强度多么微弱，照射时间多么短暂，电流计总是有电流，说明金属板上有电子跑出来。这是因为可见光的频率低，光子能量小，小于锌的电子溢出功；而紫外光的频率高，光子能量大，大于锌的电子溢出功。

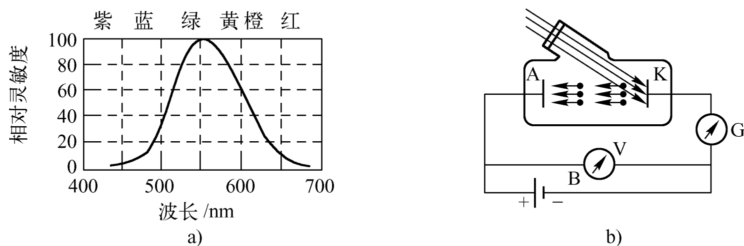


图 1-3　光的波动性和粒子性

a）人眼对不同波长光的灵敏度　b）光电效应实验装置图

1-4　频率、波长和光速有什么关系？

光在不同的介质中具有不同的传播速度，在真空中它以最大的速度直线传播，光子能量 E 可用爱因斯坦方程描述，即

$$E = mc^2 \tag{1-6}$$

式中，m 是光子质量，单位是 kg；c 是光速，单位为 m/s。

频率 ν、波长 λ 和光速 c 的关系为

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \tag{1-7}$$

用式（1-7）可进行电磁波频率与波长的换算。图 1-1 表示电磁波频率与波长的换算，同时也标出了光通信和射频信号光纤传输（RoF）所用到的波段。

从式（1-6）、式（1-7）可以得到 $\nu = mc^2/h$ 和 $m = h\nu/c^2$。当光通过强电磁场时，由于相互作用，它的运动轨迹要改变方向，电磁场越强，改变越大，如图 1-4 所示。

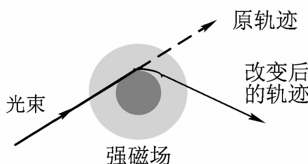


图 1-4　光通过强电磁场时轨迹要改变

1-5　模拟/数字信号的频率/比特率各用什么单位表示?

对于模拟信号，频率用 f 表示，频率是每秒传输的波数，单位为 Hz，如图 1-5a 所示。

对于数字信号，比特率用 B 表示，比特率是每秒传输的比特（bit）数，单位为 bit/s 如图 1-5b 所示。

对于模拟信号，$T = 0.2$ s，$f = 1/T = 5$ Hz，如已知 $f = 100$ Hz，则 $T = 1/f = 0.01$ s；$f = 1$ GHz，$T = 1/f = 1$ ns。

对于归零脉冲数字信号，同样，$T = 0.2$ s，$B = 1/T = 1/0.2$ s $=$ 5 bit/s，如已知 $B = 100$ bit/s，则 $T = 1/B = 0.01$ s，$B = 1$ Gbit/s，$T = 1/B = 1$ ns。

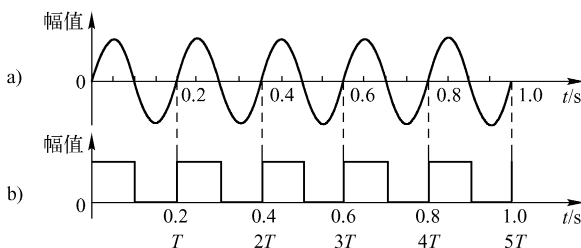


图 1-5　模拟信号和归零数字脉冲

a）模拟信号　b）归零数字脉冲

1-6　光在真空中传播和在玻璃中传播哪个快?

当光通过比真空密度大的介质时，其传播速度要减慢，如图 1-6 所示，减慢的程度与介质折射率 n 成反比，即波速 $\upsilon = c/n$，$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$是真空中的光速，$c = 3 \times 10^8$ m/s，ε_0 为真空介电常数，$\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ F/m（法拉每米），μ_0 是真空磁导率，$\mu_0 = 12.5664 \times 10^{-7}$ H/m(享利每米)，$n = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0}$为介质折射率。

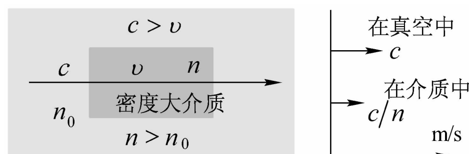


图 1-6　光通过密度大的介质传播速度要减慢

1-7　古代用光传递信息吗?

用光传递信息并不是什么新鲜事。早在公元前两千多年以前，我们的祖先就在都城和边境堆起一些高高的土丘，遇到敌人入侵，就在这些土丘上燃起烟火传递受到入侵的信息，各地诸侯看见烟火就立刻领兵来救援，这种土丘叫做烽火台，它就是一种古老的光通

信设备。其中“周幽王烽火戏诸侯”的故事流传甚广（见图 1-7，昏君周幽王为了让自己的爱妃开怀一笑，在无敌情的情况下，点燃烽火令各路诸侯派兵救援。然而当真正有敌人入侵时，再一次点燃烽火时，却没人理会，从而打了败仗)。有些地方直到现在还可以看到这种土丘。

另外，夜间的信号灯，水面上的航标灯，这种古老的光通信方式还在使用。



图 1-7　古老的光通信设备——烽火台（周幽王烽火戏诸侯）

1-8　谁发明了光电话?

1876 年，美国人贝尔（Bell）发明了光电话，他把太阳光用做光源，通过透镜把光束聚焦在送话器前的振动镜片上。人的嘴对准橡胶管前面的送话口，一发出声音，振动镜就振动而发生变形，引起光的反射系数发生变化，使光强度随话音的强弱变化，从而实现话音对光强度的调制。这种已调制的反射光通过透镜 2 变成平行光束向右边传送。在接收端，用抛物面反射镜把从大气传送来的光束反射到处于焦点的硒管上，硒的电阻随光的强弱变化，使光信号变换为电流，传送到受话器，使受话器再生出声音。在这种光波系统中，光源是太阳光，接收器是硒管，传输介质是大气，如图 1-8 所示。1880 年使用这种光电话传输距离最远仅 213 m，很显然这种系统没有实用价值。

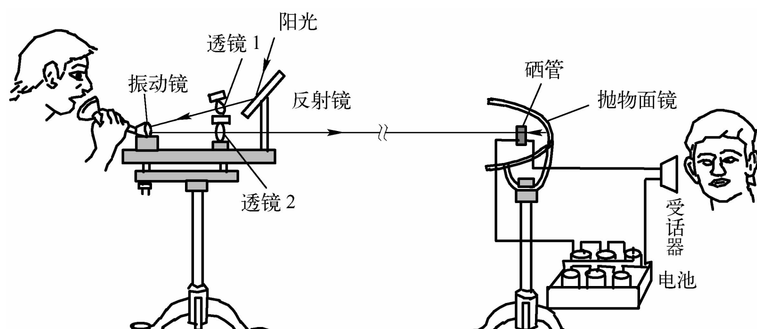


图 1-8　1876 年贝尔（Bell）光电话实验装置

1-9　谁发明了激光器？

用灯泡作光源时，调制速度非常有限，只能载运一路音频信号。

1960 年，美国人梅曼（Maiman）发明了第一台红宝石激光器，之后氦－氖（He－Ne）气体激光器、二氧化碳（CO_2）激光器也先后出现，并投入实际应用，给光通信带来了新的希望。激光（LASER）是取英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一个字母组成的缩写词，其意思是受激发射的光放大。这种光与燃烧木材和钨丝灯发出的光不一样，它是由物质原子结构的本质决定的光，它的频率很高，超过微波频率一万倍，也就是说它的通信容量要比微波大一万倍，如果每个话路频带宽度为 4 kHz，则可容纳 100 亿个话路。而且，激光的频率成分单纯，方向性好，光束发散角小，几乎是一束平行的光束，所以光通信很有吸引力。

1-10　谁是光纤通信的鼻祖？

看来，用光纤来导光进行光通信的问题似乎已解决了。其实问题并没有那么简单，因为用普通石英玻璃制成的光纤损耗很大，每公里就损耗 3 000 dB（分贝），记做 3 000 dB/km。这样的光纤，当光通过 100 m 后，它的能量就只剩下百亿分之一了。所以，要想用光

纤进行通信的关键问题是如何降低光纤的损耗。

但是到了 20 世纪 60 年代中期，情况发生了根本的变化，而且这种变化还是由一位华人引起的，他就是高锟。早在 1966 年 7 月，英籍华人高锟发表了具有历史意义的关于通信传输新介质的论文。当时他还是一个在英国 Harlow ITT 实验室工作的年轻工程师，他指出利用光导纤维进行信息传输的可能性和技术途径，从而奠定了光纤通信的基础。在高锟早期的实验中，光纤的损耗约为 3 000 dB/km，他指出这么大的损耗不是石英纤维本身的固有特性，而是由于材料中的杂质离子的吸收产生的，如果把材料中金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下，光纤损耗就可以减小到 10 dB/km，再通过改进制造工艺，提高材料的均匀性，可进一步把光纤的损耗减小到几 dB/km。这种想法很快就变成了现实，1970 年，光纤进展取得了重大突破，美国康宁（Corning）公司按照高锟的建议研制成功损耗为 20 dB/km 的石英光纤。目前 G. 654 光纤在 1. 55 μm 波长附近的损耗仅为 0. 151 dB/km，接近了石英光纤的理论损耗极限。图 1-10 表示目前利用光导纤维进行光通信的示意图。

在光纤损耗降低的同时，作为光纤通信用的光源，半导体激光器也被发明了，并取得了实质性的进展。1970 年，美国贝尔实验室和日本 NEC 公司先后研制成功室温下连续振荡的镓铝砷（GaAlAs）双异质结半导体激光器，1977 年半导体激光器的寿命已达到 10 万小时，完全满足实用化的要求。

低损耗光纤和连续振荡半导体激光器的研制成功，是光纤通信发展的重要里程碑。

在现已安装使用的光纤通信系统中，光纤长度有的很短，只有几米长（计算机内部或机房内），有的又很长，如连接洲与洲之间的海底光缆。20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可与之相比拟。光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。由于高锟在开创光纤通信历史上的卓越贡献，1998 年 IEE 授予他荣誉奖章，如图 1-9 所示。在 2009 年 10 月 6 日瑞典皇家科学院又授予高锟 2009 年度诺贝尔物理学奖。

所以人们称高锟是光纤通信的鼻祖。

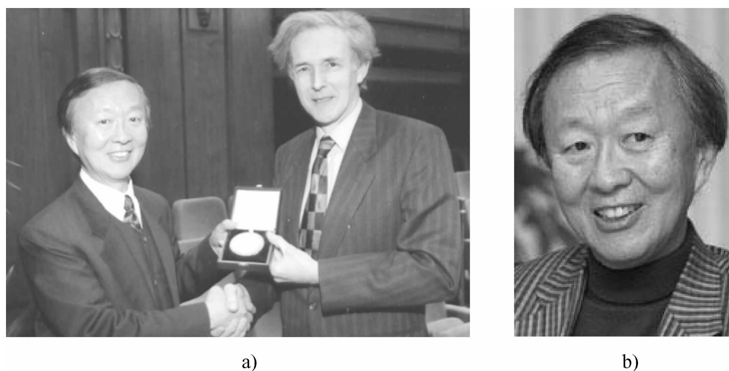


图 1-9　光纤通信的鼻祖——高锟

a）光纤通信发明家高锟（左）1998 年在英国接受 IEE 授予的奖章

b）诺贝尔物理学奖获得者高锟

1-11　光纤通信有哪些优点？

在光纤通信系统中，作为载波的光波频率比电波频率高得多，而作为传输介质的光纤又比同轴电缆损耗低得多，因此相对于电缆或微波通信，光纤通信具有许多独特的优点。

（1）频带宽、传输容量大

电缆基本上只适用于数据速率较低的局域网（LAN），高速局域网（大于 100 Mbit/s）和城域网（MAN）必须采用光纤。

（2）损耗小、中继距离长

电缆的每千米损耗通常在几分贝到十几分贝，而 1.55 μm 光纤的损耗通常只有 0.2 dB，显然，电缆的损耗明显大于光纤，有的甚至大几个数量级。

（3）重量轻、体积小

由于电缆体积和重量较大，安装时还必须慎重处理接地和屏蔽问题，在空间狭小的场合，如舰船和飞机中，这个弱点更显突出。

（4）抗电磁干扰性能好

光纤是由电绝缘的石英材料制成的，光纤通信线路不受各种电

磁场的干扰和闪电雷击的损坏，所以无金属加强筋光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围、油田、煤矿和化工等易燃易爆环境中使用。

（5）泄漏小、保密性好

在现代社会中，不但国家的政治、军事和经济情报需要保密，企业的经济和技术情报也已成为竞争对手的窃取目标。因此，通信系统保密性能是用户往往必须考虑的一个问题。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米以外的地方窃听电缆中传输的信号，可是对光缆却困难得多。因此，要求保密性高的网络不能使用电缆。

在光纤中传输的光泄漏是非常微弱的，即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具，光纤是不能分接的，因此信息在光纤中传输非常安全，对军事、政治和经济具有重要的意义。

（6）节约金属材料，有利于资源合理使用

制造同轴电缆和波导管的金属材料，在地球上的储量是有限的；而制造光纤的石英（SiO_2），在地球上的储量是无法估算的。

总之，由于通信用光纤都是用石英玻璃和塑料制成的，是极好的电绝缘体，而且光信号在光缆中传输时不易产生泄漏，所以不存在电气危害、电磁干扰、接地、屏蔽和保密性差等问题，再加上传输特性好的优点，使光纤成为迄今为止最好的信息传输媒质，因此不论是在干线网上，还是在接入网上，光纤通信都取得了飞速的发展。

1-12　如何组成一个光纤通信系统？

简单的光纤通信系统通常由发送机、传输光纤、中继器和接收机组成。发送机由调制器和光源组成，它的作用是把用户要传送的信号（如声音）变为电信号，然后使光源发出的光强随电信号变化。接收机由光探测器和解调器组成，其作用是接收光信号，并把光信号还原为携带用户信息（如声音）的电信号，这个过程称为解调，最后再变成用户能理解的信息（如声音）。光中继器使传输的光信号放大，光中继器有光－电－光中继器和直接对光放大的全光中继器。

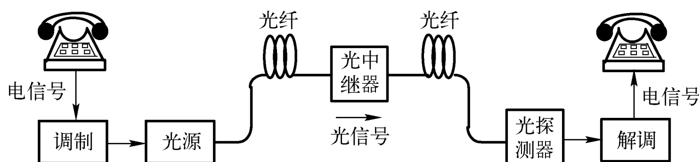


图 1-10　光纤通信系统的组成

目前，光源通常用半导体激光器及其光电集成组件。光纤短距离用多模光纤，长距离用单模光纤。光敏探测器用 PIN 光敏二极管或雪崩光敏二极管（APD）及其光电集成组件。调制器有使光信号强度随电信号变化的直接调制，这就像调幅收音机使电载波的幅度随声音的强弱变化一样；而另外一种调制方式却不同，它不会使光信号强度随电信号强弱直接变化，而是使光源发出连续不断的光波，它的强度变化是通过一个外调制器实现的，这种调制方式叫外调制。光纤就像电线一样也有损耗，所以光信号在光纤内传输时，它的光强也逐渐减弱，为此，就像在电缆通信系统中有电中继器一样，在光纤通信系统中也有光中继器，使传输的光信号放大。光中继器有光 – 电 – 光中继器和直接对光放大的全光中继器。本书就对光纤通信系统所用到的各种器件和各个组成部分逐一加以介绍。

第 2 章　光纤通信传输介质

2-1　光纤和光缆由什么物质组成？结构如何？

光纤由玻璃，即石英（SiO_2）组成。光纤和光缆结构如图 2-1 所示，光纤由玻璃制成的纤芯和包层组成，为了保护光纤，包层外面还增加尼龙外层。

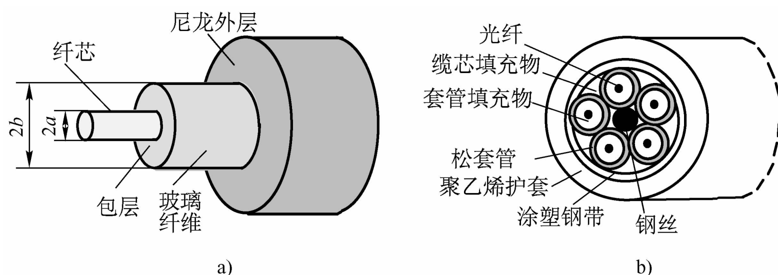


图 2-1　光纤和光缆结构示意图

a）光纤结构　b）一种光缆结构

光纤是一种纤芯折射率 n_1 比包层折射率 n_2 大的同轴圆柱形电介质波导。纤芯材料主要成分为掺杂的二氧化硅（SiO_2），纯度达 99.999%，其余成分为极少量的掺杂剂如二氧化锗（GeO_2）等，以提高纤芯的折射率。纤芯直径 $2a$ 为 8 ~ 100 μm。包层材料一般也为 SiO_2，外径 $2b$ 为 125 μm，其作用是把光强限制在纤芯内。为了增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性，还在包层外增加一层涂覆层，其主要成分是环氧树脂和硅橡胶等高分子材料。光在纤芯与包层的界面上发生全反射而被限制在纤芯内传播，包层为光的传输提供反射面和光隔离，并起到一定的机械保护作用。

实际光纤通信系统使用的光纤都是包在光缆内，光缆由许多光

纤组成，光纤外面是松套管，松套管内是填充物。光缆的中心是一条增加强度用的钢丝，最外面是保护用的护套。

2-2　插入水中的筷子为什么向上弯曲了?

光在同一种物质中传播时，光是直线传播的。但是光波从折射率较大的介质入射到折射率较小的介质时，在一定的入射角度范围内，光在边界会发生反射和折射，如图 2-2a 所示。入射光与法平面的夹角 θ_i 叫入射角，反射光与法平面的夹角 θ_r 叫反射角，折射光与法平面的夹角 θ_t 叫折射角。

把筷子倾斜地插入水中，可以看到筷子与水面的相交处发生弯折，原来的一根直直的筷子似乎变得向上弯了。这就是光的折射现象，如图 2-2b 所示。因为水的折射率要比空气的大（$n_1 > n_2$），所以折射角 θ_t 要比入射角 θ_i 大，所以我们看到水中的筷子向上翘起来了。

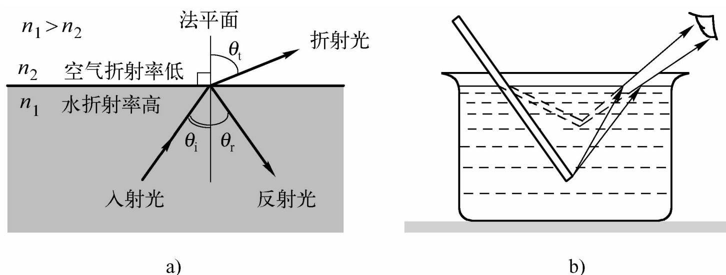


图 2-2　光的反射和折射

a）入射光、反射光和折射光　b）插入水中的筷子变得向上弯曲了

2-3　水下的潜水员在什么位置看不到岸上的姑娘? 何谓临界角?

水下的潜水员在某些位置时，可以看到岸上的人，如图 2-3 所示的入射角为 θ_{i1} 的情况，但是当他离开岸边向远处移动时，当入射角等于或大于某一角度 θ_c 时，他就感到晃眼，什么也看不见，其原因

在问 2-4 中将做进一步的解释，此时的入射角 θ_c 我们就叫临界角。

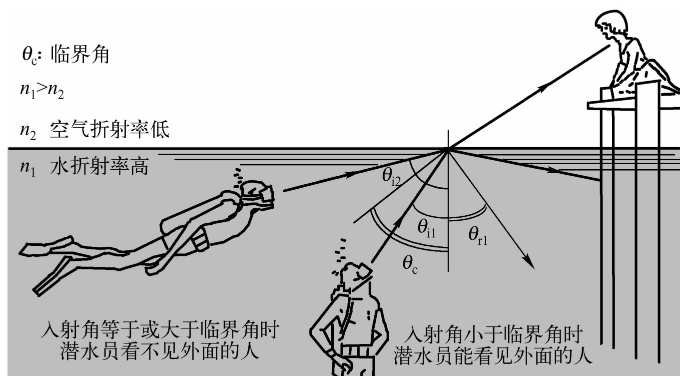


图 2-3　由于光线在界面的反射和折射，在水下不同位置的潜水员看到的景色是不一样的

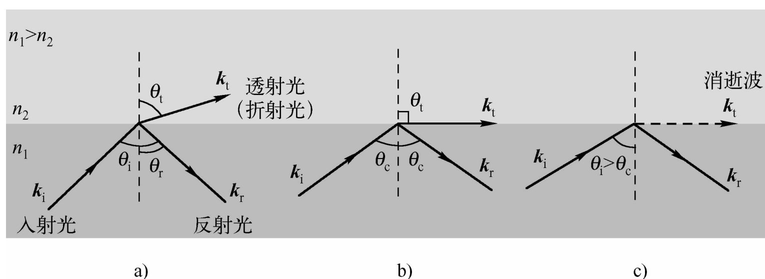


图 2-4　光波从折射率较大的介质以不同的入射角进入折射率较小的介质时出现三种不同的情况

a）$\theta_i<\theta_c$　b）临界角 $\theta_i=\theta_c$　c）全反射 $\theta_i>\theta_c$

2-4　当光波从折射率较大的介质以不同的入射角进入折射率较小的介质时会出现哪三种不同的情况？

在图 2-4a 中，由几何光学知识可以得到

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t}=\frac{n_2}{n_1} \tag{2-1}$$

这就是斯奈尔（Snell）定律，它表示入射角和折射角与介质折射率的关系。

在式（2-1）中，因 $n_1 > n_2$，所以折射角 θ_t 要比入射角 θ_i 大，当折射角 θ_t 达到 90°时，入射光沿交界面向前传播，如图 2-4b 所示，此时的入射角称为临界角 θ_c，有

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{2-2}$$

当入射角 θ_i 超过临界角 θ_c（$\theta_i > \theta_c$）时，没有折射光，只有反射光，这种现象叫做全反射，如图 2-4c 所示。这就是图 2-3 中入射角为 θ_{i2} 的那个潜水员，只觉得水面像镜面一样晃眼，看不见岸上姑娘的道理。也就是说，潜水员要想看到岸上的姑娘，入射角必须小于临界角，即 $\theta_i < \theta_c$。

由此可见，全反射就是光纤波导传输光的必要条件。光线要想在光纤中传输，必须使光纤的结构和入射角满足全反射的条件，使光线闭锁在光纤内传输。

对于 $\theta_i > \theta_c$，不存在折射光纤，即发生了全内反射。此时，$\sin\theta_t > 1$，θ_t 是一个虚构的折射角，所以沿着边界传输的光波称为消逝波。

2-5　光纤是怎样传光的？

美国人贝尔（Bell）发明的光电话用大气传输光，传输的光很容易受到天气的影响，那么能不能找到一种介质，就像电线电缆导电那样来传光呢？

古代希腊的一位吹玻璃工匠观察到，光可以从玻璃棒的一端传输到另一端。1930 年，有人拉出了石英细丝，人们就把它称为光导纤维，简称光纤或光波导，并论述了它传光的原理。接着，这种玻璃丝在一些光学机械设备和医疗设备（如胃镜）中得到应用。

现在，为了保护光纤，在它外面包上一层塑料外衣，这样它就可以在一定程度上弯曲，而不会轻易折断。那么，光能不能沿着弯曲的光纤波导传输呢？答案是肯定的。

光纤由纤芯和包皮两层组成，它们都是玻璃，只是材料成分稍

有不同。一种光纤的芯径只有 50 ~ 100 μm，包皮直径约为 120 ~ 140 μm，所以光纤很细，比头发丝还细。假定光线对着纤维以一定入射角射入光纤，如图 2-5 所示，当光线传输到芯和皮的交界面上时，会发生类似于镜子反射光的现象，当碰到对面的交界面时，又一次反射回来。当光线传输到光纤的拐弯处时，来回反射的次数就会增多，只要弯曲得不是太厉害，光线就不会跑出光纤。光线就是这样在光纤内往返曲折地向前传输的。

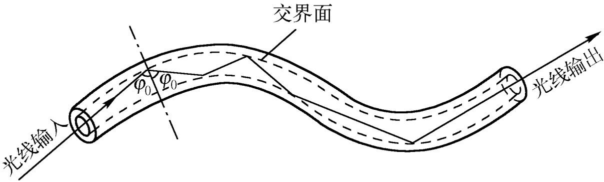


图 2-5　光线在光纤里传输的示意图

2-6　什么是阶跃光纤？什么是渐变光纤？

根据光纤横截面上折射率的径向分布情况，可以把光纤粗略地分为阶跃光纤和渐变光纤。阶跃光纤折射率在纤芯中为 n_1 保持不变，到包层中突然变为 n_2，如图 2-6a 所示。渐变光纤折射率 n_1 不像在阶跃光纤中的是个常数，而是在纤芯的中心最大，沿径向往外按抛物线形状逐渐变小，直到包层中变为 n_2，如图 2-6b 所示。

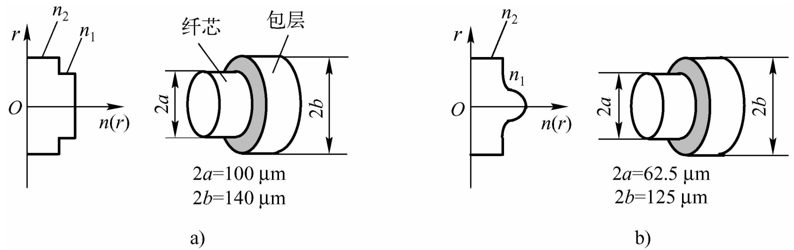


图 2-6　阶跃光纤和渐变光纤

a）阶跃（SI）光纤　b）渐变（GI）光纤

作为信息传输波导，实用光纤有两种基本类型，即多模光纤和单模光纤，如图 2-7 所示。多模光纤可以传输多个模式的光，而单模光纤却只能传输一个模式的光。图 2-7 也表示出这两种光纤内的光线在纤芯传播的路径，由于光线在这两种光纤中传播的路径不同，单模光纤只有一个模式，而且是直线传输；而多模光纤有多个模式，且每个模式传输的路径不同，高阶模比低阶模传输的路径长，所用的时间就长，到达终点的时间不同，几种模式的光合在一起就使输出脉冲相对于输入脉冲展宽了。

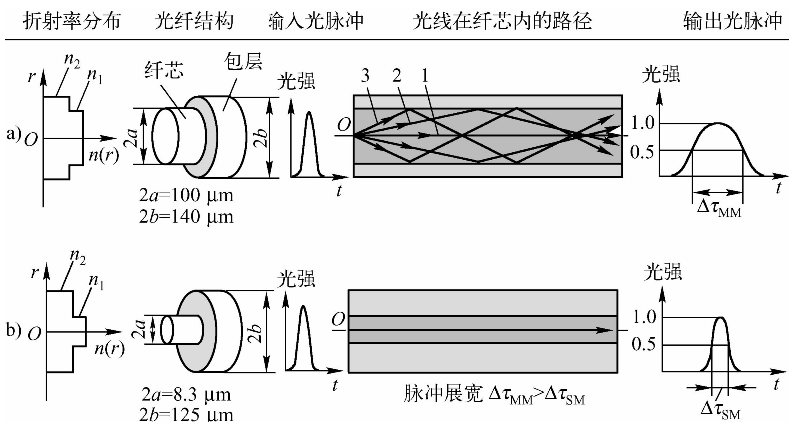


图 2-7　多模光纤和单模光纤

a）多模（MM）光纤　b）单模（SM）光纤

2-7　为什么渐变多模光纤内的光线能同时到达输出端？

渐变（GI）多模光纤折射率 n_1 不像在阶跃多模光纤中的是个常数，而是在纤芯中心最大，沿径向往外按抛物线形状逐渐变小，直到包层变为 n_2，如图 2-6b 所示。这样的折射率分布可使光纤内的光线同时到达终点，其理由是，虽然各模光线以不同的路径在纤芯内传输，但是因为这种光纤的纤芯折射率不再是一个常数，所以各模的传输速度也各不相同。沿光纤轴线传输的光线速度最慢（因 $n_{1,r\to0}$ 最大，所以速度 $c/n_{1,r\to0}$ 最小）；光线 3 到达末端传输的距离最长，但是它的传输速度最快（因 $n_{1,r\to a}$ 最小，所以速度 $c/n_{1,r\to a}$ 最快），这样

一来到达终点所需的时间几乎相同。

为了进一步理解渐变多模光纤的传光原理，可把这种光纤看做由折射率恒定不变的许多同轴圆柱薄层 n_a、n_b 和 n_c 等组成，如图 2-8a 所示，而且 $n_a > n_b > n_c > \cdots$。使光线 1 的入射角 θ_A 正好等于折射率为 n_a 的 a 层和折射率为 n_b 的 b 层的交界面 A 点发生全反射时的临界角 $\theta_c(ab) = \arcsin(n_b/n_a)$，然后到达光纤轴线上的 O' 点。而光线 2 的入射角 θ_B 却小于在 a 层和 b 层交界面 B 点处的临界角 θ_c(ab)，因此不能发生全反射，而光线 2 以折射角 $\theta_{B'}$ 折射进入 b 层。如果 n_b 适当且小于 n_a，光线 2 就可以到达 b 和 c 界面的 B' 点，它正好在 A 点的上方（OO' 线的中点）。假如选择 n_c 适当且比 n_b 小，使光线 2 在 B' 发生全反射，即 $\theta_{B'} > \theta_C(bc) = \arcsin(n_c/n_b)$。于是通过适当地选择 n_a、n_b 和 n_c，就可以确保光线 1 和 2 通过 O'。那么，它们是否同时到达 O' 呢？由于 $n_a > n_b$，所以光线 2 在 b 层要比光线 1 在 a 层传输得快，尽管它传输的路径比较长，也能够赶上光线 1，所以几乎同时到达 O' 点。这种渐变多模光纤的传光原理，相当于在这种波导中有许多按一定的规律排列着的自聚焦透镜，把光线局限在波导中传输，如图 2-9 所示。

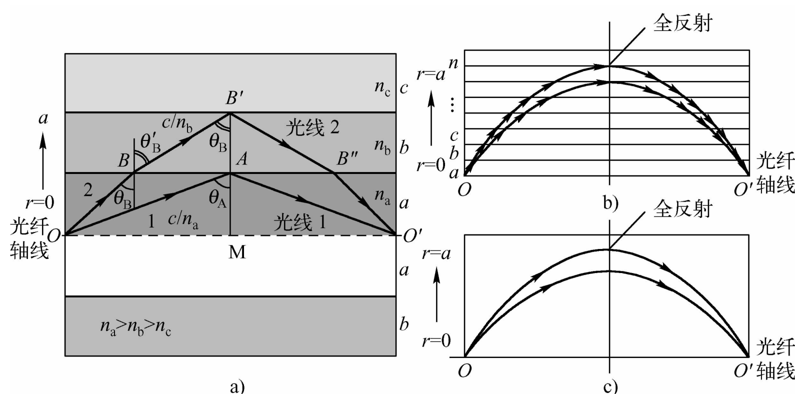


图 2-8　渐变（GI）多模光纤内光线传输路径不同但同时到达终点说明

实际上，渐变光纤的折射率是连续变化的，所以光线从一层传输到另一层也是连续的，如图 2-8b 和图 2-8c 所示。当光线经多次折射后，总会找到一点，其折射率满足全反射。

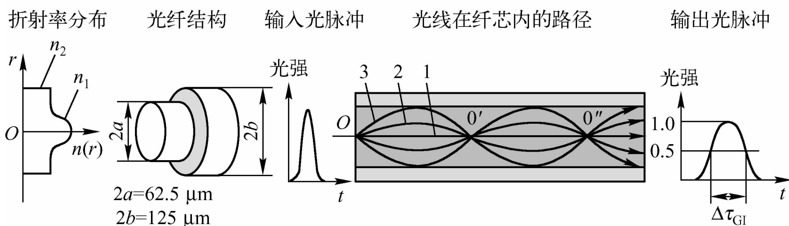


图 2-9　渐变折射率多模光纤的结构、折射率分布和在纤芯内的传输路径

2-8　光线在单模光纤中传输为什么比在多模光纤中传输得快?

单模光纤的芯径要比多模光纤的大，当光纤的芯径很小时，光纤只允许与光纤轴线一致的光线通过，即只允许通过一个基模。只能传播一个模式的光纤称为单模光纤。单模光纤的纤芯直径比多模光纤小得多，模场直径只有 9 ~ 10 μm，仅是多模光纤的十分之一，光线沿轴线直线传播，如图 2-7b 所示，传播速度最快，输出脉冲信号到达终点的展宽（$\Delta\tau_{1/2}$）最小。

多模光纤和单模光纤传播速度的差异可以用图 2-10 形象地表示，三种汽车各有不同的外形和速度，代表不同的模式，模式越高传输越慢。

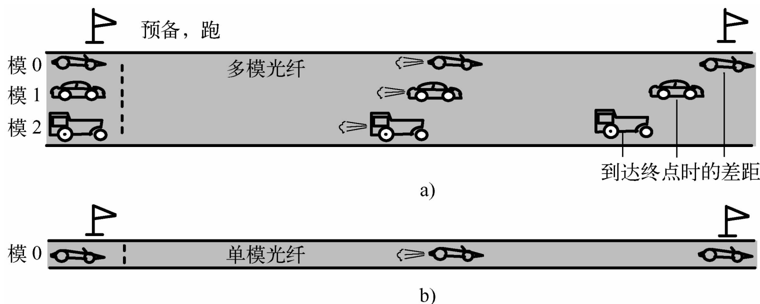


图 2-10　多模光纤和单模光纤传播速度的差异

a）多模光纤　b）单模光纤

2-9　光纤是如何制造出来的？

我们知道，光纤的纤芯折射率 n_1 比包层折射率 n_2 高，如图 2-7 所示。纤芯材料主要成分为 SiO_2，其余成分为极少量的掺杂剂（如 GeO_2 等），以提高纤芯的折射率。包层材料一般也为 SiO_2，作用是把光强限制在纤芯中，为了增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性，还在包层外增加一层涂覆层，其主要成分是环氧树脂和硅橡胶等高分子材料。

制造光纤时，需要先熔制出一根合适的玻璃棒，如图 2-11a 所示。为使光纤的纤芯折射率 n_1 比包层折射率 n_2 高，首先在制备纤芯玻璃棒时，要均匀地掺入少量比石英折射率高的材料（如锗）；接着在制备包层玻璃时，再均匀地掺入少量比石英折射率低的材料（如硼）。这就制成了拉制光纤的原始玻璃棒，通常把它叫做光纤预制棒。把预制棒放入高温（约 2 000℃）拉丝炉中加温软化，拉制成线径很细的玻璃丝，如图 2-11b 所示，同时在玻璃丝外增加一层高分子材料涂覆层，以便增强玻璃丝的柔韧性和机械强度。这种玻璃丝中的纤芯和包皮的厚度比例和折射率分布与预制棒材料的完全一样。

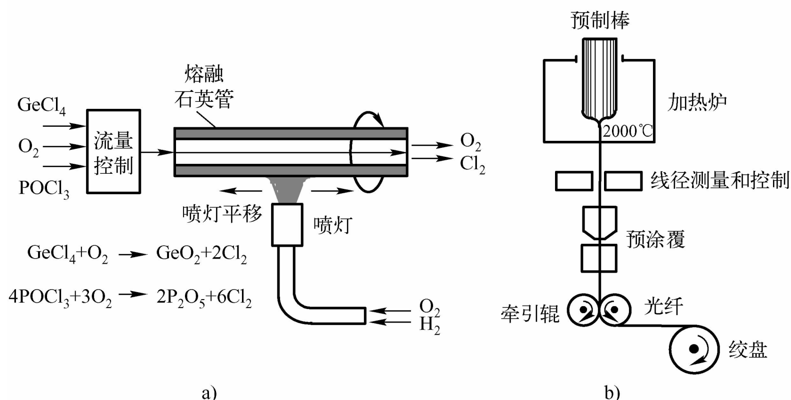


图 2-11　光纤预制棒制造和拉丝装置示意图

a）预制棒制造原理图　b）拉丝装置示意图

这种只有约为 125μm 粗细的玻璃丝就是通信用的导光纤维，简称为光纤。当然，为了使纤芯直径在拉制过程中保持一致，还需要对线径进行测量控制。

2-10　光纤有损耗吗？

光纤是熔融 SiO_2 制成的，光信号在光纤中传输时，由于 SiO_2 材料并不完全纯净，这些杂质对光产生吸收。除吸收损耗外，由于构成 SiO_2 的离子晶格在光波（电磁波）的作用下发生振动，也要损失能量。此外，还有散射损耗，这种散射是由在光纤制造过程中材料密度的不均匀（造成折射率不均匀）产生的。光纤对光能量的吸收损耗、散射损耗和辐射损耗，使光在光纤中传输时逐渐衰减，如图 2-12 所示。

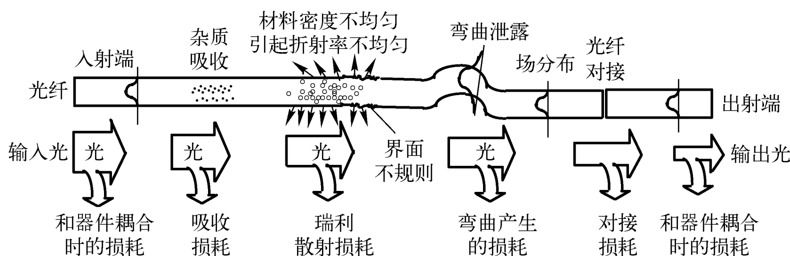


图 2-12　光纤传输线的各种损耗引起光在光纤中传输时逐渐衰减

另外，在密集波分复用（DWDM）系统中，不同波长的光同时注入一根光纤，波长越多，注入光纤的能量就越大，当光纤中传输的光强大到一定程度时就会产生受激拉曼散射、受激布里渊散射和四波混频等非线性现象，使输入光能量转移到新的频率分量上，产生非线性损耗。

通常，光纤内传输的光功率 P 随距离 z 的衰减，可以用下式表示：

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \tag{2-3}$$

式中，α 是衰减系数。如果 P_{in} 是在长度为 L 的光纤输入端注入的光

功率，根据式（2-3），输出端的光功率应为

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L) \tag{2-4}$$

习惯上，功率（P）的单位为分贝毫瓦（dBm），衰减系数（α）的单位为 dB/km，由式（2-4）得到用分贝表示的衰减系数为

$$\alpha_{dB} = \frac{1}{L} 10\lg\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) \tag{2-5}$$

2-11　dBm 与 mW、μW 如何换算?

在光纤通信系统中，常以 1 mW 作为参考电平，相对于 1 mW 用 dB 表示的功率值用 dBm 表示。当 P 的单位为 mW 时，如换算为 dBm 时就为

$$P_{dBm} = 10 \lg P_{mW} \tag{2-6}$$

当 P 的单位为 μW 时，如换算为 dBm，则

$$P_{dBm} = 10 \lg P_{\mu W} - 30 \tag{2-7}$$

例如 1 μW，换算为 dBm 时，10 lg 1 − 30 = − 30 dBm

又如 2. 81 μW，换算为 dBm 时，10 lg 2. 81 − 30 = −25. 51 dBm

当 P 的单位为 nW 时，如换算为 dBm 时，则

$$P_{dBm} = 10 \lg P_{nW} - 60 \tag{2-8}$$

图 2-13 表示 dBm 与 mW、μW 的换算，由该图可知，1 mW 等于 0 dBm，10^3 mW 等于 30 dBm。

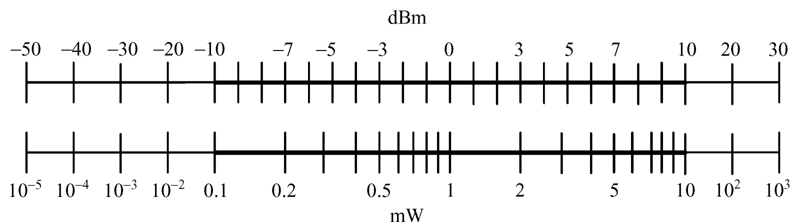


图 2-13　dBm 与 mW、μW 的换算

2-12　如何用功率比表示 dB 值?

分贝（dB）是表示通信系统中相对的功率电平，如果光源发出

的功率 P_1，经光纤线路传输后，在接收端的功率是 P_2，则光纤线路的损耗是 P_2/P_1，用分贝表示就是

$$P_{dB} = 10\ \lg \frac{P_2}{P_1} \tag{2-9}$$

P_2 和 P_1 的单位必须相同。dB 值可正可负，这要取决于 $P_2 > P_1$ 还是 $P_2 < P_1$。令 $P_1 = 1$ mW，即可得到以 mW 为单位的 P_2 值的 dBm 值，即

$$P_{dBm} = 10\ \lg P_2 \tag{2-10}$$

如果已知 P_1，则用下式求得 P_2：

$$P_2 = P_1 10^{P_{dB}/10} \tag{2-11}$$

2-13　光纤的损耗与波长有关吗?

光纤的损耗与波长有关，波长越长，损耗越小，图 2-14 给出了典型单模光纤和多模光纤衰减谱。由图可知，单模光纤衰减在波长为 1. 55 μm 时是 0. 19 dB/km，在波长为 1. 30 μm 时是 0. 35 dB/km。

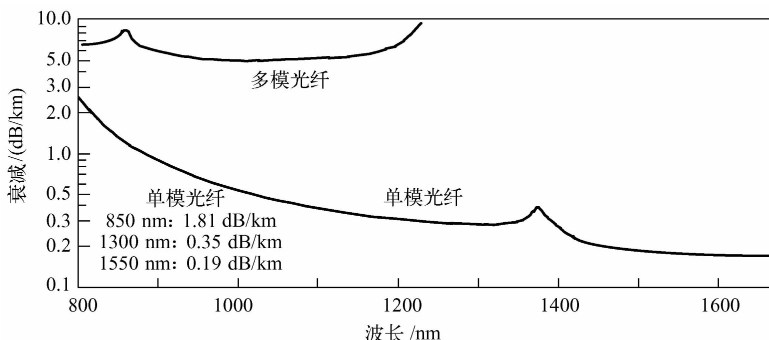


图 2-14　典型光纤衰减谱

2-14　什么是色散？光纤色散是如何产生的?

色散是日常生活中经常会碰到的一种物理现象。一束白光通过一块玻璃三角棱镜时，在棱镜的另一侧被散开，变成五颜六色的光

带，在光学中称这种现象为色散，如图 3-15 所示。

当光信号通过光纤时，也要产生色散现象。色散是由于不同成分的光信号在光纤中传输时，因群速度不同产生不同的时间延迟而引起的一种物理效应。光信号分量包括发送信号调制和光源谱宽中的频率分量，以及光纤中的不同模式分量。

在折射率为 n_1 的均匀波导中，平面波的传播速度为 $\boldsymbol{v}=c/n_1$，也就是说，介质波导（折射率为 n_1）中的光速比真空中的光速 c 慢，前者是后者的 $1/n_1$。玻璃的 $n_1\approx1.5$，因而在玻璃中的光速度要比在真空中的慢 33%。现在考虑传输模中的一条光线，如图 2-15 所示，它在纤芯内以角度 θ 全反射，在介质中的光速 $\boldsymbol{v}=c/n_1$。但是，能量沿波导传输的速度是

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}=\boldsymbol{v}\cos\theta=\frac{c}{n_1}\cos\theta \tag{2-12}$$

这一速度称为群速度，它表示调制光脉冲包络的传播速度，如图 2-15 所示。

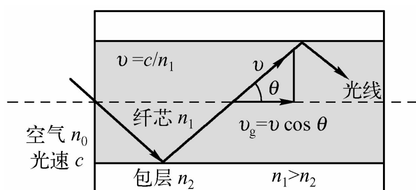


图 2-15　阶跃型光纤波导的群速度 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}$

群速度和光纤模式有关，模数不同，其群速度也不同。由于不同的模有不同的传播速度，因而在入射端输入的光脉冲中，次数越高的模越滞后。这并不难理解，因为模的次数越高，其角度 θ 越大（见图 2-16），传播就需要更多的时间。

2-15　什么是模式色散？它是如何影响系统性能的？

模式色散是由于在多模光纤中，不同模式的光信号在光纤中传输的群速度不同，引起到达光纤末端的时间延迟不同，经光电探测

后各模式混合使输出光生电流脉冲相对于输入脉冲展宽了，如图 2-16 所示。由图 2-16 可见，在多模光纤输入端，最初各模重合，但是由于零阶模（$N=0$）光线的入射角 θ_0 比基模（$N=1$）的入射角 θ_1 小，所以零阶模光线到达输出端的时间 τ_0 比基模光线到达输出端的时间 τ_1 要短，即 $\tau_0<\tau_1$，所以在接收端经光探测转换成电流信号后，各模光线混合后使输出光生电流脉冲相对于输入脉冲展宽了 $\Delta\tau$。

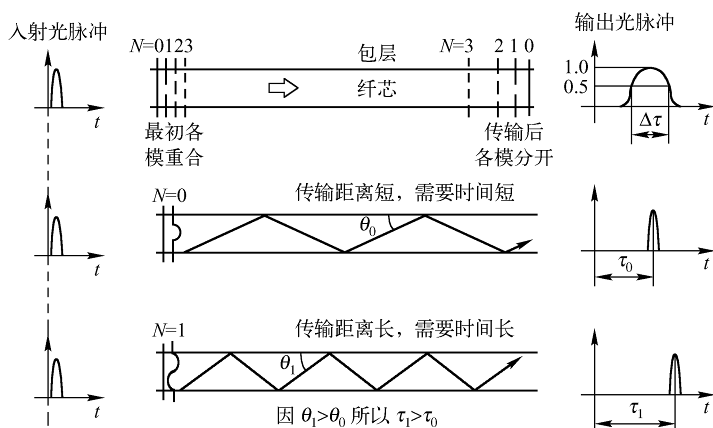


图 2-16　模式色散

模式色散引起脉冲展宽，从而影响到光纤所能传输的最大信号比特速率 B，由脉冲展宽决定的归零码（RZ）光纤比特速率 B 为

$$B<\frac{1}{2\Delta\tau}=\frac{c}{2L\Delta n} \tag{2-13}$$

式中，c 为光速；L 为光纤长度；Δn 为光纤包层和纤芯折射率差。

2-16　为什么渐变折射率多模光纤的色散比阶跃光纤的小？

阶跃多模光纤的主要缺点是光线在光纤内传输的路径不同，传输延时不同，存在较大的模间色散，光纤带宽很窄；而单模光纤没有模间色散，只有模内色散，所以带宽很宽。但是随之出现的问题是，由于单模光纤芯径很小，所以把光耦合进光纤是很困难的。那

么是不是可以制造一种光纤，既没有模间色散，带宽较宽，芯径较大，又使光耦合容易呢？这就是图 2-8 所示的渐变折射率多模光纤，简称渐变多模光纤。

可以这样理解阶跃多模光纤存在的色散，在图 2-15 中，代表各模的光线以不同的路径在纤芯内传输，在传输速度相同的情况下（均为 c/n_1，c 是自由空间光速），到达终点所需的时间也不同。例如，编号为 1 的光线直线传输，路径最短，到达光纤末端所需的时间最短；编号为 3 的光线曲折传输，路径最长，到达光纤末端所需的时间最长。所以这些光线经接收机内的光探测器变成各自的光电流，这些光电流在时域内叠加后，使输出脉冲相对于输入脉冲展宽了 $\Delta\tau_{SI}$，但它比阶跃多模光纤的 $\Delta\tau_{MM}$ 要小，而又比单模光纤的 $\Delta\tau_{SM}$ 要大。

第 3 章　光纤通信器件

在光纤通信系统中，除光纤光缆外，还包括许多光无源器件，例如光纤连接器、耦合器、可调谐光滤波器、波分复用/解复用器、调制器、光开关、光隔离器、光环形器和光分插复用器等。光无源器件的性能直接影响着通信系统的质量和可靠性。

3-1　什么是光纤连接器？什么是连接器跳线？

连接器是把两个光纤端面结合在一起，以实现光纤与光纤之间可拆卸（活动）连接的器件，对这种器件的基本要求是使发射光纤输出的光能量最大限度地耦合进接收光纤。连接器是光纤通信中应用最广泛、最基本的光无源器件。连接器尾纤（即一端有活动连接器的光纤）用于和光源或检测器耦合，构成发射机或接收机的输出，或各种光无源器件两端的接口等。连接器跳线（两头都有光纤活动连接器的一小段光纤）用于终端设备和光缆线路及各种光无源器件之间的互连，以构成光纤传输系统。

对连接器要求主要是连接损耗（插入损耗）小、回波损耗大、多次插拔重复性好、互换性好、环境温度变化时性能保持稳定，并有足够的机械强度。

连接器的基本结构包括接口零件、光纤插针和对中三部分。光纤插针的端面有平面、球面（PC）或斜面，如图 3-1a 所示 。对中可以采用套管结构、双锥结构、V 形槽结构或透镜耦合结构。光纤插针可以采用微孔结构、三棒结构或多层结构，因此连接器的结构也是多种多样的。采用套管结构对中和微孔结构光纤插针固定效果最好，又适合大批量生产，得到了广泛的应用，如图 3-1b 所示。

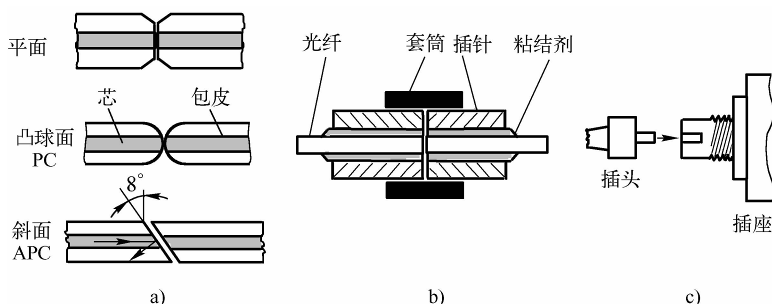


图 3-1　常用连接器物理接触和插座

a）三种常见的物理接触　b）光纤插针与套管连接示意图

c）连接器插头和插座

3-2　什么是光耦合器？有哪几种光耦合器？

光耦合器的功能是把一个或多个光输入分配给多个或一个光输出。光耦合器对线路的影响是插入损耗，可能还有一定的反射和串音。选择光耦合器的主要依据是实际应用场合。有四种基本类型的光耦合器，分别是 T 形耦合器、星形耦合器、方向耦合器和波分耦合器，其基本结构如图 3-2 所示。

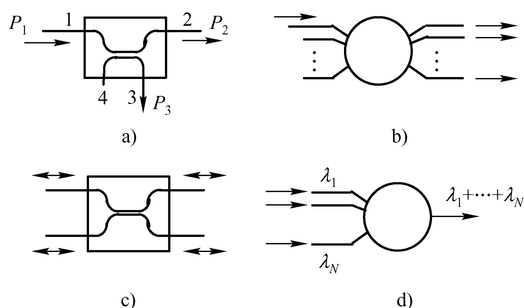


图 3-2　光耦合器基本结构

a）T 形耦合器　b）星形耦合器　c）方向耦合器　d）波分耦合器

方向耦合器是构成光纤分配网络的基础，它是一种 2 ×2 光纤耦合器，如图 3-2c 所示。图中用箭头表示允许光纤功率通过的方向。

2×2 光纤耦合器是一种与波长无关的方向耦合器，它是通过热熔拉伸把扭合在一起的两根光纤加工成双锥形状做成的耦合波导。

图 3-2a 表示少用 1 个端口的 3 端口 2×2 方向耦合器，即变成 T 形耦合器，它的功能是把一根光纤输入的光功率分配给 2 根光纤。这种耦合器可以用做不同分光比的功率分路器。T 形耦合器可以是与波长无关的耦合器，也可以是与波长有关的耦合器，如图 3-3b 所示。为了描述该耦合器的特性，我们假定入射到端口 1 的功率为 P_1，根据所需要的分光比，把 P_1 功率在端口 2 和 3 之间分配。理想情况下，同侧输入的光功率不能耦合到同侧的端口（如端口 4，为此称其为隔离端口），所以这种耦合器称为方向耦合器。

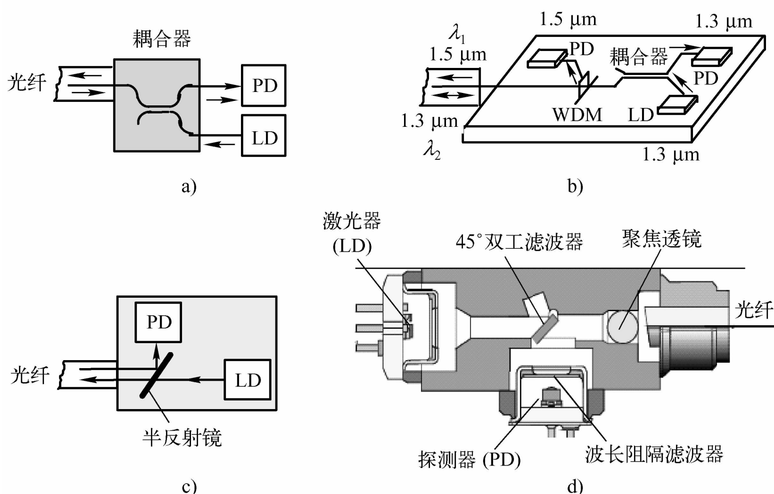


图 3-3　单纤双向光耦合器

a）1×2 耦合器　b）与波长有关的 WDM 耦合器
c）2×2 双向耦合器　d）实用 2×2 双向耦合器

3-3　什么是可调谐光滤波器?

电子滤波器是从包含多个频率分量的电子信号中提取出所需要频率的信号，让其通过的滤波器叫做带通滤波器，阻止其通过的叫

做带阻滤波器。光滤波器也与此类似，它是光通信系统，特别是 WDM 网络中非常重要的器件。人们可以把这种光滤波器放在光探测器的前端构成一个调谐接收机，当把这种滤波器放在激光腔体内时，又可以构成波长可调光源。

光频滤波根据其机理可分为干涉（衍射）型和吸收型两类，每一类根据其实现的原理又可以分为若干种，根据其调谐的能力又可分为光频固定滤波器和光频可调谐滤波器。

可调谐光滤波器是一种波长（或频率）选择器件，它的功能是从许多不同频率的输入光信号中选择一个特定频率的光信号。图 3-4 给出可调谐光滤波器的基本功能，图中 Δf_s 为输入的最高频率信道和最低频率信道之间的频率差，Δf_{ch} 为信道间隔。如果调谐范围覆盖的 Δf_L 等于光纤整个 1.3 μm 或 1.5 μm 低损耗窗口，那么调谐范围应为 200 nm（25 000 GHz），实际系统的要求往往小于这个数值。$T(f)$ 为滤波器的传输函数。

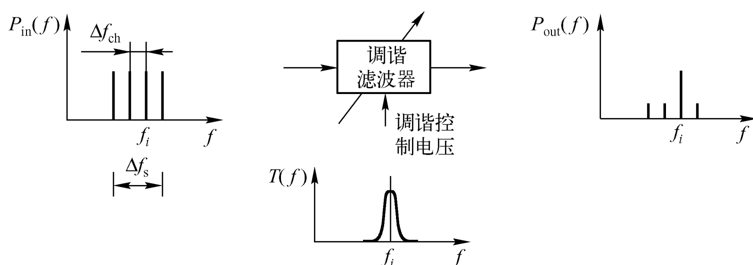


图 3-4　可调谐光滤波器的基本功能

在 WDM 系统中，每个接收机都必须选择所需要的信道。信道的选择可以采用相干检测或直接检测技术来实现。若采用相干检测，则要求有可调谐本地振荡器；若采用直接检测，则要求在接收机前放置可调谐光滤波器。

3-4　什么是干涉？如何构成法布里－珀罗（F-P）谐振腔？

干涉就是两列波或多列波叠加时因为相位关系有时相互加强，

有时相互削弱的一种波的基本现象。例如，分别在水池中相隔不远的两处同时投进一块石头，就会产生同样的水波，都向四周传播，仔细观察两列水波会合处的情景，即可发现其幅度时而因相长干涉增大，时而因相消干涉减小，如图 3-5 所示。这就是波的干涉现象，光作为一种电磁波也有这种现象。

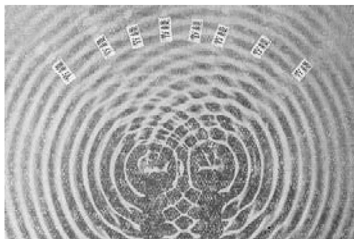


图 3-5　水池中两列水波的干涉波纹

在了解光波的干涉现象之前，让我们先回忆一个已知的力学问题——长 L 的一根弦线两端被夹住时所作的各种固有振动方式，如图 3-6 所示。在振动弦线中，边界条件要求弦线两端各有一个节点，也就是说，选择波长 λ 时一定要使半波长的整数倍等于弦线的长度，即

$$L = m\frac{\lambda}{2} \quad 或 \quad \lambda = \frac{2L}{m} \quad m = 1,2,3,\cdots \tag{3-1}$$

或者说，波长 λ 因其要满足式（3-1）而被整数化了。弦线的波扰动可用驻波来描述，图 3-6 表示 $m = 1,2,3$ 时的三种振动方式驻波的振幅函数曲线。

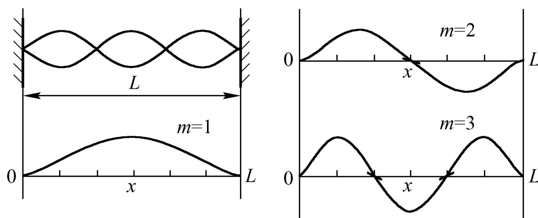


图 3-6　一根长 L 的绷紧弦线三种可能的振动方式

与电谐振一样，光也有谐振，光波在谐振腔内也存在相长干涉和相消干涉，谐振时也可以通过谐振腔存储能量并选出所需波长的光波。

基本的谐振腔是由置于自由空间的两块平行镜面 M_1 和 M_2 组成的，如图 3-7a 所示。光波在 M_1 和 M_2 间反射，导致这些波在空腔内相长干涉和相消干涉。从 M_1 反射的 A 光向右传输，先后被 M_2 和 M_1 反射，也向右传输变成 B 光，它与 A 光的相位差是 $k(2L)$，式中，k 为波矢量，如果 $k(2L)=2m\pi$（m 为整数），则 B 光和 A 光发生相长干涉，其结果是在空腔内产生了一列稳定不变的电磁波，我们把它称为驻波。因为在镜面上（假如镀金属膜）的电场必须为零，所以谐振腔的长度是半波长的整数倍，即

$$m\left(\frac{\lambda}{2}\right)=L,m=1,2,3\cdots \tag{3-2}$$

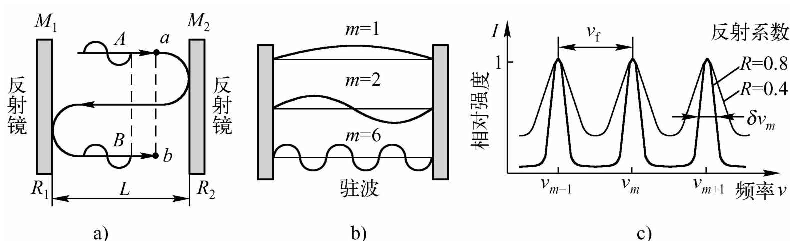


图 3-7　法布里－珀罗（F-P）谐振腔及其特性

a）反射镜干涉　b）只有特定波长的驻波才能在谐振腔内存在
c）不同反射系数的驻波电场和频率的关系

由式（3-2）可知，不是任意一个波长都能在谐振腔内形成驻波的，对于给定的 m，只有满足式（3-2）的波长才能形成驻波，并记为 λ_m，称为腔模式，如图 3-7b 所示。因为光频和波长的关系是 $\nu=c/\lambda$，所以对应这些模式的频率 ν_m 是谐振腔的谐振频率，即

$$\nu_m=m\left(\frac{c}{2L}\right)=m\nu_f,\nu_f=\frac{c}{2L} \tag{3-3}$$

式中，ν_f是基模（$m=1$）的频率，在所有模式中它的频率最低。两个相邻模式的频率间隔是 $\nu_m=\nu_{m+1}-\nu_m=\nu_f$，称为自由频谱范围（FSR）。图 3-7c 说明了谐振腔允许形成驻波模式的相对强度与频率

的关系。假如谐振腔没有损耗，即两个镜面对光全反射，那么式（3-3）定义的频率 ν_m 的峰值将很尖锐。如果镜面对光不是全反射，一些光将从谐振腔辐射出去，ν_m 的峰值就不尖锐，而具有一定的宽度。显然，这种简单的镀有反射镜面的光学谐振腔只有在特定的频率内能够储存能量，这种谐振腔就叫做法布里-珀罗（Fabry-Perot）光学谐振器。

镜面反射系数 R 越小，意味着谐振腔的辐射损耗就越大，从而影响到腔体内电场强度的分布。R 越小，峰值展宽越大，如图 3-7c 所示，该图也定义了法布里-珀罗谐振腔的频谱宽度 $\delta\nu_m$，它是单个腔模式曲线半最大值的全宽（FWHM），当 $R>0.6$ 时，可用下面的简单表达式计算：

$$\delta\nu_m = \frac{\nu_{\mathrm{f}}}{F} \qquad F = \frac{\pi R^{1/2}}{1-R} \tag{3-4}$$

式中，F 称为谐振腔的精细度，它随着谐振腔损耗的减小而增加（因 R 增加）。精细度越大，模式峰值越尖锐。精细度是模间隔 $\Delta\nu_m$ 对频谱宽度 $\delta\nu_m$ 的比。

3-5 商用干涉滤波器的工作原理是什么？

法布里-珀罗光学谐振腔已广泛应用于激光器、干涉滤波器和分光镜中。考虑一束光入射进法布里-珀罗谐振腔，如图 3-8 所示。谐振腔由部分反射和透射的两个相互平行的平板镜组成，因此入射光的一部分进入腔长为 L 的谐振腔。由式（3-3）可知，只有特定腔模的光才能在腔内建立起振荡，其他波长的光因产生相消干涉而不能存在。于是，假如入射光中有一个波长的光与谐振腔中的一个腔模对应，它就可以在腔内维持振荡，并有一部分光从右边反射镜透射出去，变成输出光。商用干涉滤波器就是基于这种原理，如图 3-8 所示。入射光通过由部分反射镜组成的法布里-珀罗光学谐振腔，其透射光可以作为滤波器的输出，调节腔长 L 可选择所需的波长输出，即可以调节腔长 L 来扫描不同的波长，从而实现调谐。

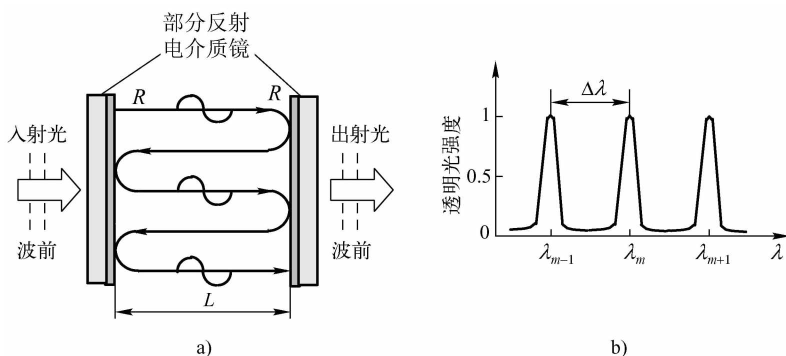


图 3-8　入射光通过由部分反射镜组成的法布里-珀罗谐振腔，其透射光可作为滤波器的输出，调节腔长 L 可选择所需的波长输出

a）有部分反射电介质镜构成的法布里－玻罗谐振腔　b）透射光强度和波长的关系

3-6　什么是 F-P 干涉仪？如何构成光纤 F-P 干涉仪

基本法布里－珀罗（F-P）干涉仪（见图 3-9）是由两块平行镜面组成的谐振腔构成的，一块镜面固定，另一块可移动，以改变谐振腔的长度。镜面是经过精细加工并镀有金属反射膜或多层介质膜的玻璃板。由光纤输入的光经过谐振腔反射一次后，聚焦在输出光纤端面上，借助改变谐振腔的长度达到从波分复用信道中选取所需信道的目的。但这种结构的干涉仪构成的滤波器体积大，使用不便。

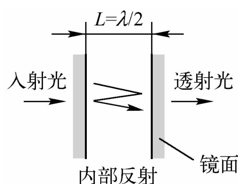


图 3-9　基本 F-P 干涉仪

光纤法布里－珀罗（F-P）干涉仪，如图 3-10 所示，光纤端面本身就充当两块平行的镜面。如果将光纤（即 F-P 的反射镜面）固定在压电陶瓷上，通过外加电压使压电陶瓷产生电致伸缩作用来改变谐振腔的长度，同样可以从复用信道中选取所需要的信道。这种结构可实现小型化。

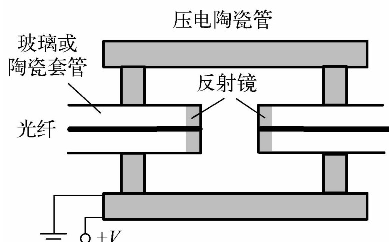


图 3-10 光纤 F-P 干涉仪

3-7 什么是马赫－曾德尔（M-Z）滤波器?

图 3-11 表示马赫－曾德尔（Mach-Zehnder）干涉滤波器的示意图，它由两个 3 dB 耦合器串联组成一个马赫－曾德尔干涉仪，干涉仪的两臂长度不等，光程差为ΔL。

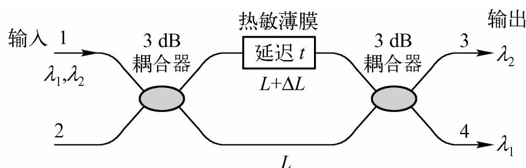


图 3-11 马赫－曾德尔干涉滤波器

马赫-曾德尔干涉滤波器的原理是基于两个相干单色光经过不同的光程传输后的干涉理论。考虑两个波长 λ_1 和 λ_2 复用后的光信号由光纤送入马赫-曾德尔干涉滤波器的输入端 1，两个波长的光功率经第一个 3 dB 耦合器均匀地分配到干涉仪的两臂上，由于两臂的长度差为 ΔL，所以经两臂传输后的光，在到达第二个 3 dB 耦合器时就产生相位差 $\Delta\phi = 2\pi f(\Delta L)n/c$（见（式 1-4）），式中，$n$ 是波导折射率指数，复合后每个波长的信号光在满足一定的相位条件下，在两个输出光纤中的一个相长干涉，而在另一个相消干涉。如果在输出端口 3，λ_2 满足相长条件，λ_1 满足相消条件，则输出 λ_2 光；如果在输出端口 4，λ_2 满足相消条件，λ_1 满足相长条件，则输出 λ_1 光。

3-8　什么是介质薄膜光滤波解复用器？

介质薄膜光滤波解复用器由多层电介质镜组成，电介质镜由数层折射率交替变化的电介质材料组成，如图 3-12a 所示，并且 $n_1 < n_2$，每层的厚度为 $\lambda_L/4$，λ_L 是光在电介质层传输的波长，且 $\lambda_L = \lambda_o/n$，λ_o 是光在自由空间的波长，n 是光在该层传输的介质折射率。从界面上反射的光相长干涉，使反射光增强，如果层数足够多，波长为 λ_o 的反射系数接近 1。图 3-12b 表示典型的多层电介质镜反射系数与波长的关系。

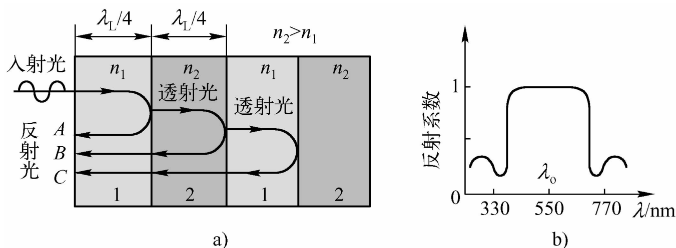


图 3-12　多层电介质镜工作原理

a）反射光相长干涉　b）反射系数与波长的关系

对于介质 1 传输的光在介质 1 和 2 的界面 1-2 反射的反射系数是 $r_{12} = (n_2 - n_1)/(n_1 + n_2)$，而且是正数，表明没有相位变化。对于介质 2 传输的光在介质 2 和 1 的界面 2-1 反射的反射系数是 $r_{21} = (n_1 - n_2)/(n_2 + n_1)$，其值是负数，表明相位变化了 π。于是通过电介质镜的反射系数的符号交替发生变化。考虑两个随机的光波 A 和 B 在两个前后相临的界面上反射，由于在不同的界面上反射，所以具有相位差 π。反射光 B 进入介质 1 时已经历了两个（$\lambda_L/4$）距离，即 $\lambda_L/2$，相位差又是 π。此时光波 A 和 B 的相位差已是 2π。于是光波 A 和 B 是同相，于是产生相长干涉。与此类似，我们也可以推导出光波 B 和 C 产生相长干涉。因此，所有从前后相临的两个界面上反射的波都具有相长干涉的特性，经过几层这样的反射后，透射光强度将很小，而反射系数将达到 1。

介质薄膜光滤波器解复用器利用光的干涉效应选择波长。可以将每层厚度为 1/4 波长、高低折射率材料（例如 TiO_2 和 SiO_2）相间组成的多层介质薄膜，用做干涉滤波器，如图 3-13a 所示。在高折射率层反射光的相位不变，而在低折射率层反射光的相位改变 180°。连续反射光在前表面相长干涉复合，在一定的波长范围内产生高能量的反射光束，在这一范围之外，则反射很小。这样通过多层介质膜的干涉，就使一些波长的光通过，而另一些波长的光透射。用多层介质膜可构成高通滤波器和低通滤波器。两层的折射率差应该足够大，以便获得陡峭的滤波器特性。用介质薄膜滤波器可构成 WDM 解复用器，如图 3-13b 和图 3-14 所示。

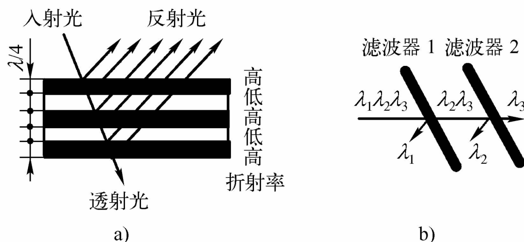


图 3-13　介质薄膜滤波器构成解复用器

a）介质薄膜滤波器　b）解复用器

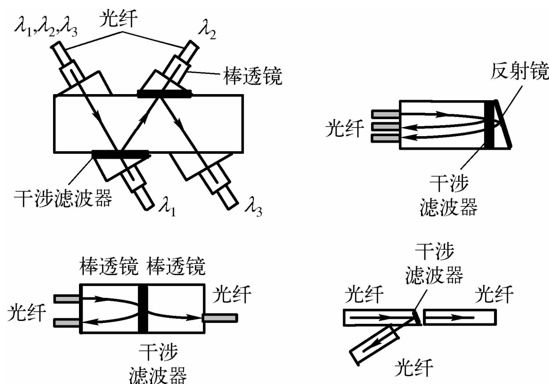


图 3-14　用介质薄膜滤波器构成的几种解复用器

插入损耗 2 波复用为 1.5 dB，6 波复用为 2 dB，所以插入损耗很低，但是波长不能微调。

3-9　三角棱镜如何将太阳白光分解为七色光谱？

1666 年，英国物理学家牛顿做了一次非常著名的实验，他用三角棱镜将太阳白光分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的七色光谱，如图 3-15a 所示。其原因如下：

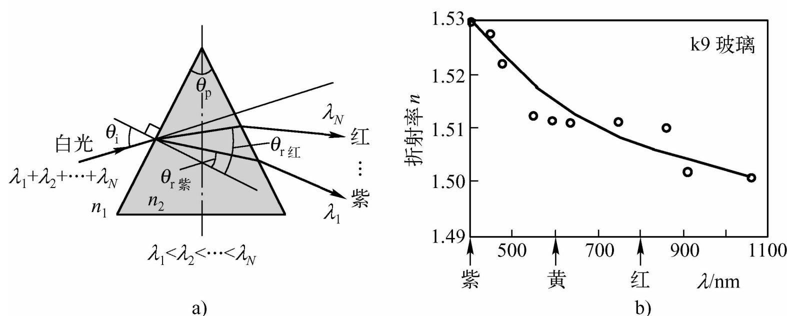


图 3-15　棱镜对入射白光的解复用

a）棱镜对入射白光解复用成七色光谱　b）玻璃折射率和波长的关系

光从空气射入某种介质发生折射时，如果入射角用 θ_i 表示，折射角用 θ_r 表示，则介质的折射率为

$$n=\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r}\quad 或\quad \sin\theta_r=\frac{\sin\theta_i}{n} \tag{3-5}$$

我们已知道，光在介质中的速度 $v=c/n$ 比光在空气中的速度 c 要慢，所以任何介质的折射率都大于 1。并且，当光从空气射向任何介质时，入射角一定大于折射角。

白光是由各种单色光组成的复色光，红光波长最长，紫光波长最短。不同波长的光通过同一种介质时，因折射率 $n(\lambda)$ 与波长有关，图 3-15b 表示用 k9 玻璃给出的不同波长下的折射率参数画出的曲线，由图可见，波长不同，折射率也不同，各单色光的偏折角

$\sin\theta_r = \sin\theta_i / n$ 也不同。其中，紫光在玻璃中的折射率在这七色光中最大（$n_{紫光}=1.532$），而红光则最小（$n_{红光}=1.513$），所以紫光在玻璃中的折射角 $\theta_{r紫}$最小，因此紫光就位于光谱的下端；红光的折射角 $\theta_{r红}$最大，因此红光位于光谱的上端，如图 3-15a 所示。橙、黄、绿、青、蓝等色光，按波长的长短，依次排列在红光和紫光之间。棱镜就是这样把白光分解成七色光谱的。

3-10　什么是波分复用器？什么是波分解复用器？棱镜如何完成波分解复用？

波分复用器（WDM）是将输入的多个波长的光信号复用在一起，而波分解复用器的功能和波分复用器的正好相反，它是把多个波长的光信号分解为单个波长的信号，分别如图 3-16a 和图 3-16b 所示。

在图 3-16c 中，WDM 光是由各种单色光组成的复色光，并且 $\lambda_1 < \lambda_2 \cdots < \lambda_N$，$\lambda_1$ 光波长最短，λ_N光波长最长。不同波长的光通过同一种介质时，因折射率 $n(\lambda)$ 与波长有关。各单色光的偏折角 $\sin\theta_r = \sin\theta_i / n$ 也不同。其中，λ_1光在玻璃中的折射率在该 WDM 信号中最大，而 λ_N光则最小。λ_1光在玻璃中的折射角最小，而 λ_N光则最大。所以，λ_1光就位于解复用光谱的下端，λ_N光位于光谱的上端。其他单色光，按波长的长短，依次排列在 λ_1光和 λ_N光之间。棱镜就是这样完成解复用的。

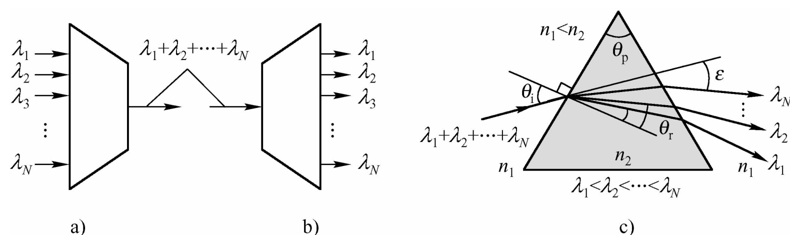


图 3-16　波分复用/解复用器

a）波分复用器　b）波分解复用器　c）棱镜波分解复用器

3-11　什么是阵列波导光栅（AWG）复用/解复用器?

图 3-17 表示平板阵列波导光栅（AWG）结构，这种器件由 N 个输入波导、N 个输出波导、两个具有相同结构的 $N \times N$ 平板波导星形耦合器以及一个平板阵列波导光栅组成。这种光栅中的矩形波导尺寸约为 $6\,\mu m \times 6\,\mu m$，相邻波导间具有恒定的路径长度差 ΔL，其相邻波导间的相位差由式（1-4）得到

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_{eff}\Delta L}{\lambda} \tag{3-6}$$

式中，λ 是信号波长；ΔL 是路径长度差，通常为几十微米；n_{eff} 为信道波导的有效折射率，它与包层的折射率差相对较大，使波导有大的数值孔径，以便提高与光纤的耦合效率。

输入光从第一个星形耦合器输入，在输入平板波导区（即自由空间耦合区）模式场发散，把光功率几乎平均地分配到波导阵列输入端中的每一个波导，由阵列波导光栅的输入孔阑捕捉。由于阵列波导中的波导长度不等，由式（3-6）可知，不同波长的输入信号产生的相位延迟也不等。随后，光场在输出平板波导区衍射汇聚，不同波长的信号光经过干涉聚焦在像平面的不同位置，通过合理设计输出波导端口的位置，实现不同波长的信号就出现在不同的输出口。此处设计采用对称结构，根据互易性，同样也能实现合波的功能。

AWG 光栅工作原理是基于马赫—曾德尔干涉仪的原理，即多个相干单色光经过不同的光程传输后的干涉理论，所以输出端口与波长有一 一对应的关系，也就是说，由不同波长组成的入射光束经阵列波导光栅传输后，依波长的不同就出现在不同的波导出口上。

在图 3-17 中，自由空间区两边的输入/输出波导的位置和弯曲阵列波导的位置满足罗兰圆（Rowland）和光栅圆规则，即输出波导的端口以等间距设置在半径为 R 的光栅圆周上，而输入波导的端口等间距设置在半径为 $R/2$ 的罗兰圆的圆周上。光栅圆周的圆心在中心输入/输出波导的端部，并使阵列波导的中心位于光栅圆与罗兰圆的切点处。

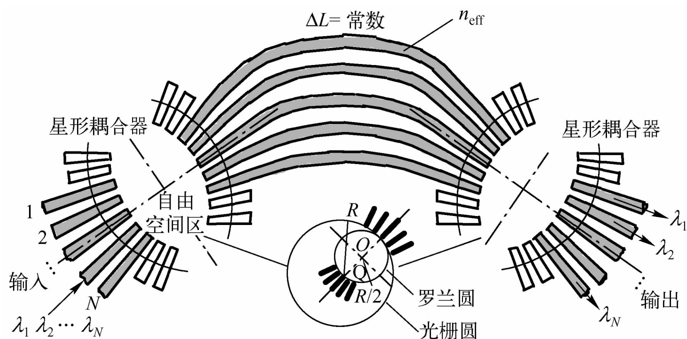


图 3-17　由阵列波导光栅（AWG）组成的解复用器/路由器

这种 AWG 器件适合大规模集成，是一种很有发展前途的制造单模光纤波分复用/解复用器的方法。

3-12　什么是光交换?

我们知道，构成一个电交换系统的最简单方法是用电开关。每个电开关都可以在控制信号的控制下，使它的入线和出线接通或断开。用这样的一些电开关排成阵列，并在控制端加上控制信号，就可以使有些开关接通，有些开关断开，相应的入线和出线就可以连接起来了，如图 3-18 所示。

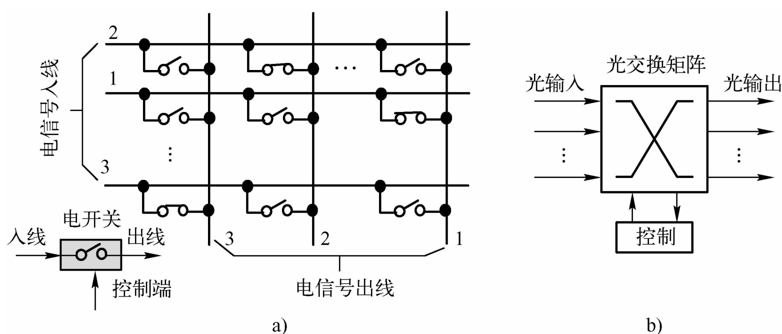


图 3-18　电交换系统和光交换系统

a）电交换系统和电开关　b）光交换系统组成

同样，构成一个光交换系统的最简单方法是用光开关。与电开关不同的是，光开关接通或断开的是光信号，其功能是转换光路，实现光信号的交换。对光开关的要求是插入损耗小、串音低、重复性高、开关速度快、回波损耗小、消光比大、寿命长、结构小型化和操作方便。

光开关可以分为两大类：一类是利用电磁铁或步进电动机驱动光纤或透镜来实现光路转换的机械式光开关，这类光开关技术比较成熟，在插入损耗、消光比和偏振敏感性方面具有良好的性能，也不受调制速率和方式的限制，但开关时间较长（几十毫秒到毫秒量级），开关尺寸较大，而且不易集成。最近出现的微机电系统（MEMS）光开关，采用机械光开关的原理，但又能像波导开关那样，集成在单片硅基底上，所以很有发展前途。另一类光开关是利用固体物理效应（如电光、磁光、热光和声光效应）的固体光开关，其中电光式、磁光式光开关突出的优点是开关速度快（毫秒到亚毫秒量级），体积非常小，而且易于大规模集成，但其插入损耗、隔离度、消光比和偏振敏感性指标都比较差。

3-13　什么是微机电系统（MEMS）光开关？

微机电系统光开关可分为移动光纤式光开关、移动套管式光开关和移动透镜（包括反射镜、棱镜和自聚焦透镜）式光开关。图 3-19a 表示 $1\times N$ 移动光纤式光开关，它用电磁铁驱动活动臂移动，切换到不同的固定臂光纤。图 3-19b 表示 1×2 移动反射镜式光开关。光开关有 1×1、$1\times N$ 和 $M\times N$ 等几种。

微机电系统（MEMS）光开关已成为 DWDM（密集型光波复用）网中大容量光交换技术的主流，它是一种在半导体衬底材料上，用传统的半导体工艺制造出可以前倾后仰、上下移动或旋转的微反射镜阵列，在驱动力的作用下，对输入光信号可切换到不同输出光纤的微机电系统。通常微反射镜的尺寸为 140 μm ×150 μm，驱动力可以利用热力效应、磁力效应和静电效应产生。这种器件的特点是体积小、消光比大、对偏振不敏感、成本低，其开关速度适中，插入损耗小于 1 dB。

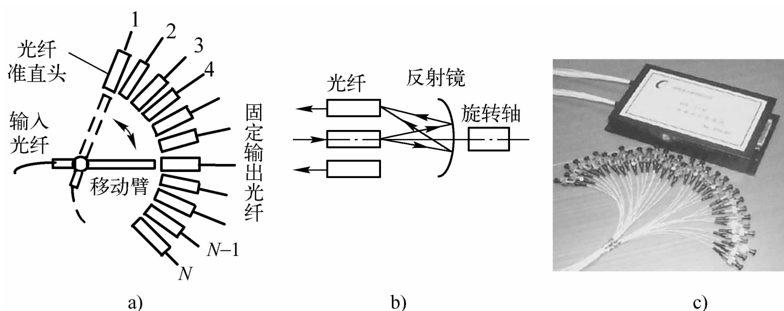


图 3-19　机械式光开关

a）1 × N 移动光纤式光开关　b）1 × 2 移动反射镜式光开关
c）1 × N 多通道光开关

图 3-20 表示一种可上下移动微反射镜的 MEMS 光开关，它有一个用镍制成的微反射镜（高 80 μm × 宽 120 μm × 厚 30 μm），装在用镍制成的悬臂（长 2 mm × 宽 100 μm × 厚 2 μm）末端。当悬臂升起来时，入射光可以直通过去，开关处于平行连接状态，如图 3-20a 所示；当悬臂放下时，入射光被反射出去，开关处于交叉连接状态，如图 3-20b 所示。平行连接状态转变到交叉连接状态是靠静电力将悬臂吸引到衬

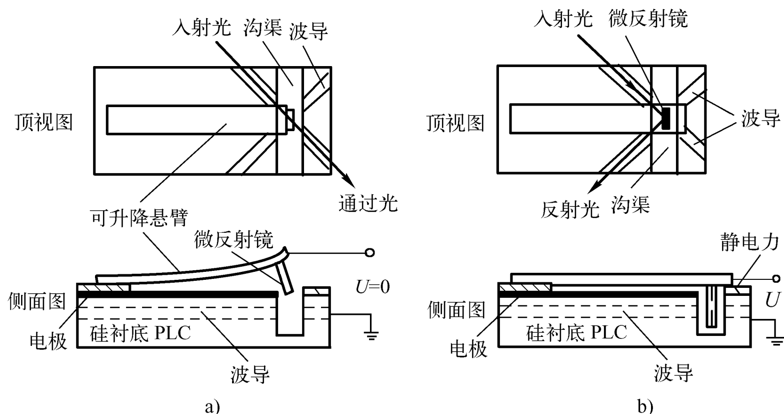


图 3-20　可升降微反射镜式光开关

a）平行连接状态　b）交叉连接状态

底上实现的，静电力由加在悬臂和衬底间的电压（30 ~ 40 V）产生。衬底上有一个宽约 50 μm 的沟渠，以便让悬臂上的微反射镜插入。

图 3-21 为可旋转微反射镜式光开关，当反射镜取向 1 时，输入光从输出波导 1 输出；当反射镜取向 2 时，输入光从输出波导 2 输出。微反射镜的旋转由控制电压完成，通常为 100 ~ 200 V。图 3-22 为可立卧微反射镜式光开关，当反射镜立起时，输入光从输出光纤 1 输出；当反射镜卧倒时，输入光从输出波导 2 输出，这类器件的插入损耗小于 1 dB，消光比大于 60 dB，切换功率为 2 mW，其开关速度约 10 ms，比波导开关慢。

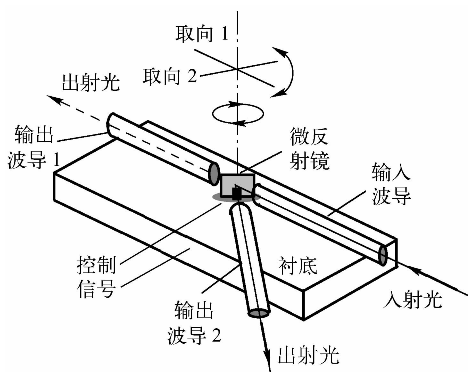


图 3-21　可旋转微反射镜式光开关

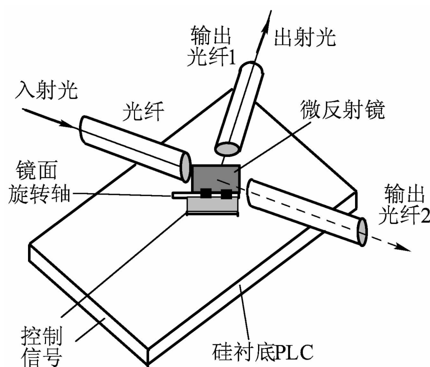


图 3-22　可立卧微反射镜式光开关

第 4 章　光纤通信光发射机

在光纤通信系统中，将电信号转变为光信号是由光发射机来完成的。光发射机的关键器件是光源，最常用的光源是半导体激光器（LD），尤其是单纵模（或单频）半导体激光器，在高速率、大容量的数字光纤系统中得到广泛应用。近年来逐渐成熟的波长可调谐激光器是多信道 WDM 光纤通信系统的关键器件，越来越受到人们的关注。

4-1　直接调制和外调制发射机有何不同?

对激光器可以进行直接调制，即注入调制电流实现光波强度调制，如图 4-1a 所示。响应速度快、输出波形好的调制电路是获得好

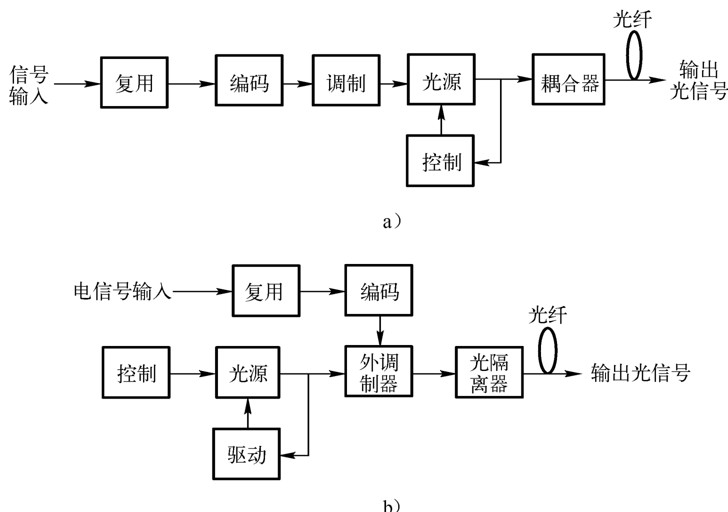


图 4-1　光数字发射机原理框图

a）直接调制光发射机框图　b）外腔调制光发射机框图

的光调制波形的前提条件。信号经复用和编码后，通过调制器对光源进行光强度调制。发送光的一部分反馈到光源的输出功率稳定电路，即进行光功率控制（AGC）。因为输出光功率与温度有关，一般还加有自动温度控制（ATC）电路。

图 4-1b 是采用外部调制器的光发射机电路，光源发出的连续光信号，送入外调制器，信息信号经复用、编码后通过外调制器对连续光的强度、相位或偏振进行调制。尽管大多数情况均采用直接调制光载波的幅度，但是在高速率密集型光波复用（DWDM）系统和相干检测系统中必须采用光的外调制。

4-2　为什么半导体晶体能够发光?

我们知道，白炽灯是把被加热钨原子的一部分热激励能转变成光能，发出宽度为 1 000 nm 以上的白色连续光谱。

在构成半导体晶体的原子内部，存在着不同的能带。如果占据高能带（导带）E_c的电子跃迁到低能带（价带）E_v上，就将其间的能带差 $\Delta E = E_c - E_v$以光的形式放出，如图 4-2 所示。这时发出的光，其波长基本上由能带差ΔE 所决定。能带差ΔE 和发出光的振荡频率 ν_o之间有$\Delta E = h\nu$ 的关系，h 为普朗克常数，$h = 6.625 \times 10^{-34}$ J · s 。由$\lambda = c/\nu$ 得出（单位为 μm）

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1.2398}{\Delta E} \tag{4-1}$$

式中，c 为光速；ΔE 取决于半导体材料的本征值，单位是电子伏特（eV）。

电子从高能带跃迁到低能带把电能转变成光能的器件叫发光二极管（LED）。对于大量处于高能带的电子来说，当返回 E_v能级时，它们各自独立地发射一个一个的光子。因此，这些光波可以有不同的相位和不同的偏振方向，它们可以向各自方向传播，如图 4-4a 所示。同时，高能带上的电子可能处于不同的能级，它们自发辐射到低能带的不同能级上，因而使发射光子的能量有一定的差别，这些光波的波长并不完全一样。因此自发辐射的光是一

种非相干光。

4-3　激光器（LD）和发光二极管（LED）有何不同？激光器和探测器有何本质区别？

从问 4-2 我们已经知道，发光二极管（LED）是一种非相干光，它由自发辐射产生，如图 4-7d 所示；而激光器（LD）是一种相干光，如图 4-7c 所示，它由受激发射产生。所以 LED 的光谱很宽，只能用于短距离传输；而 LD 的光谱较窄，可以用于较长距离传输。

发光过程，除自发辐射外，还有受能量等于能带差 $\Delta E = E_c - E_v = h\nu$ 的光所激发的受激发射，如图 4-3 所示。受激发射生成的光子与原入射光子一模一样，是指它们的频率、相位、偏振方向及传播方向都相同，它和入射光子是相干的，如图 4-4b 所示。受激发射发生的概率，与入射光的强度成正比。

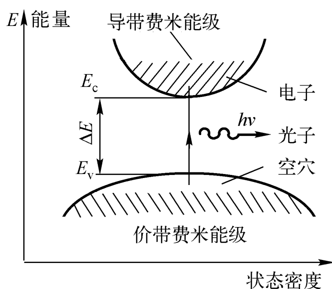


图 4-2　半导体发光原理图

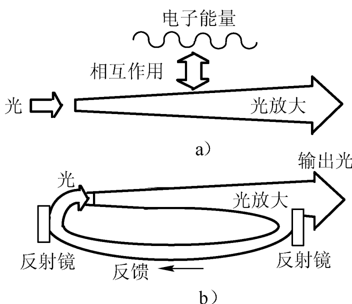


图 4-3　受激发射导致光放大和振荡

反之，如果把能量大于 $h\nu$ 的光照射到占据低能带 E_v 的电子上，则该电子吸收该能量后被激励而跃迁到较高的能带 E_c 上。在半导体结上外加电场后，可以在外电路上取出处于高能带 E_c 上的电子，使光能转变为电流，如图 4-4c 所示，这就是光接收器件。

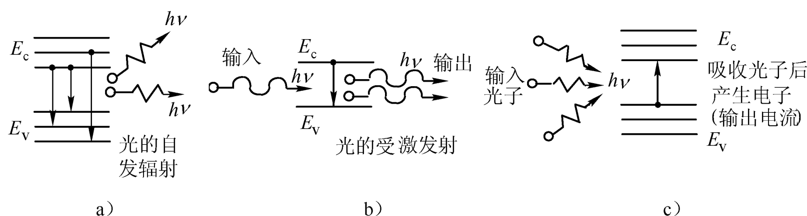


图 4-4　光的自发辐射、受激发射和吸收

a）光的自发辐射——发光二极管　b）光的受激发射——激光器

c）光的吸收——光探测器

4-4　什么是相干光？什么是非相干光？

从问 1 - 2 已经知道，我们可以用下面的纯正弦波描述一个传播的电磁波（用电场描述）

$$E_x = E_o \sin(\omega_o t - k_o z) \tag{4-2}$$

式中，$\omega_o = 2\pi\nu_o$ 是角频率；k_o 是波数或传播常数。我们假定该电磁波无限扩展到所有的空间，并在所有的时间均存在，如图 4-5a 所示，这样的纯正弦波是完全相干的，因为波上的所有点是可以预见的。完全相干可以这样理解它的含义，从波上某一点的相位可以预见该波上任一其他点的相位。例如，在图 4-5a 中，在给定的空间位置，波形上被任一时间间隔分开的任意两点如 P 和 Q 总是相关的，因为可以从 P 点的相位预见到任一时间间隔 Q 点的相位，这就是时间相干。任意与时间相关的随机函数 $f(t)$ 可用频率、幅度和相位各不相同的多个正弦波之和来表示，我们只需要一个如式（4-2）描述的频率为 $\nu_o = \omega_o/2\pi$ 的纯正弦波来说明时间的相干性，如图 4-5a 所示。

纯正弦波只是一种理想的正弦波，实际上它只在有限的时间间隔 Δt 内对应有限的空间长度 $L = c\Delta t$ 内存在，如图 4-5b 所示，该 Δt 可能是光源的发射过程，如“1”码时对一个激光器输出的调制过程，实际上光波的幅度也并不总是恒定不变的。我们只对一列光波上在 Δt 期间内或空间距离 $L = c\Delta t$ 内一些点的相关性感兴趣，如果在 Δt 期间或 $L = c\Delta t$ 距离内相关，我们就说这列波具有相干时间 Δt 和相干长度 $L = c\Delta t$。在图 4-5b 中，因为它并不是理想的正弦波，在它的频谱中包括许多频

率分量，计算表明，构成这列有限光波的最重要的频率成分是在中心频率 ν_o 附近，即最重要的频率成分位于 $\Delta\nu = 1/\Delta t$ 内（见图 4-5b 右图），$\Delta\nu$ 是频谱宽度，它与时间相干长度 Δt 有关，即

$$\Delta\nu = \frac{1}{\Delta t} \tag{4-3}$$

因此相干和频谱宽度有密切的关系，例如发射波长为 589 nm 的钨灯频谱宽度为 $\Delta\nu = 5\times10^{11}$ Hz，这意味着它的相干时间 $\Delta t = 2\times10^{-12}$ s，或 2 ps，它的相干长度 $L = 6\times10^{-4}$ m，或 0.60 mm。多模 He－Ne 激光器的频谱宽度为 1.5×10^{9} Hz，对应的相干长度是 200 mm。由于单模连续波激光器具有很窄的线宽，所以它的相干长度可达几百米，因此已广泛应用于光干涉及其相关的应用中。

图 4-5c 表示白光是一种非相干光，它的频谱包括很宽的频率范围，它是理想的非相干光，实际上的光均在图 4-5a 和图 4-5c 所示的频率范围之间。

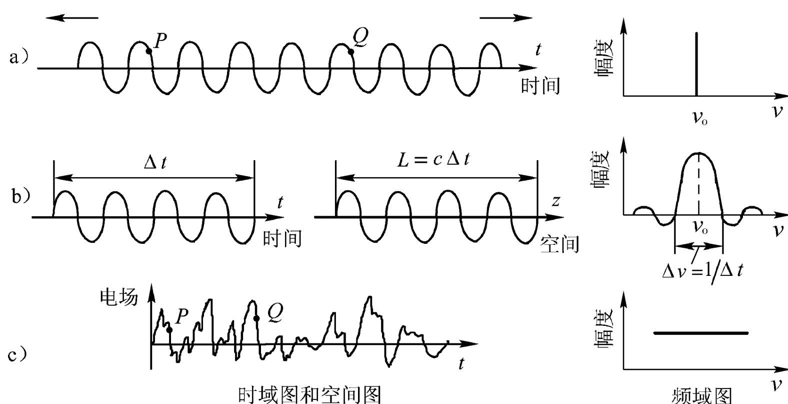


图 4-5　相干光、非相干光及其频谱

a）正弦波是完全相干波　b）相干时间和相干长度　c）非相干光

两个波的相干性表示这两个波的相关程度，图 4-6a 中的光 A 和光 B 具有相同的频率，但是它们只在时间间隔 Δt 内一致，因此它们只在 Δt 内相干，这种现象称它们在间隔 Δt 内互相干。它只能在下面的情况下出现，即当相干长度均为 L 的在不同通道传输的完全相同

的两列波到达目的地时，只有在空间距离为 $L=c\Delta t$ 范围内干涉。

空间相干描述的是在一个光源上不同位置发射的光波间的相干程度，如图 4-6b 所示。假如光源上 P 和 Q 两点上发射的光波具有相同的相位，此时 P 和 Q 是空间相干源。尽管空间相干源在整个发射表面发射的光同相位，然而这些光在空间并不总能满足相干条件，可能只有在部分时间相干，因此这些波只在相干长度 $L=c\Delta t$ 内同相位。平面波是一种空间上完全相干的波，光通过分离的两个狭缝（或针孔）后会发生干涉（见图 4-13），同一波面的光经透镜聚焦后几乎成一点。实际上，由于衍射现象，这个点的直径约为波长的几倍。

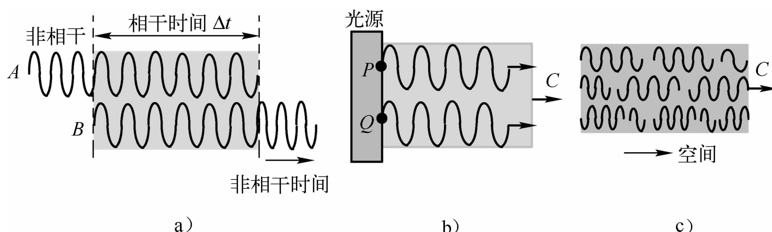


图 4-6　相干光和非相干光

a）互相干，两列波只有在 Δt 期间内发生相干

b）空间相干源　c）非相干光束

与相干光相反，非相干光波可以看做是由各种平面光波或者波面已严重失真的光随机相互叠加而成。太阳光近似为平面波，但由于太阳各部分发出来的光的波面互相重叠，经透镜会聚后，仍旧形成太阳的象。它是光斑，而不是点。发光二极管发出的光，时间相干性和空间相干性都不好，如图 4-7d 所示。通过毛玻璃的相干光也没有空间的相干性，其波面已严重失真。

与此相反，来自遥远星球并经单色滤光片分出来的光，以及现在所讲的激光器发出的光，其空间相干性都非常好，可认为是近似于从点光源发出的光，如图 4-7c 所示。

由于非相干光是不同方向的波面的叠加，所以散发到各个方向的光不能聚焦成一点，而是成了光源的实像。

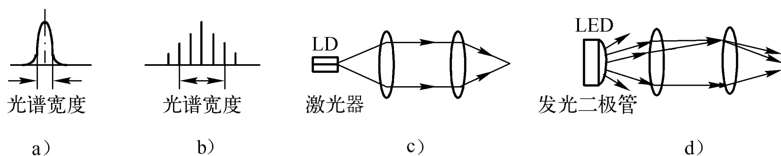


图 4-7　各种光源比较
a）近乎单色的光源　b）含有多个波长的光源
c）近乎点光源的光源　d）空间相干性差的光源

大部分非相干光束在其横截面上包含一些时间和相位都随机变化的光波，如图 4-6c 所示。

4-5　LD 激光发射的条件是什么?

半导体激光器的结构是一个法布里–珀罗谐振腔，如图 4-8 所示。激光器工作在正向偏置下，当注入正向电流时，高能带中的电子密度增加，这些电子自发地由高能带跃迁到低能带发出光子，形成激光器中初始的光场。在这些光场作用下，受激发射和受激吸收过程同时发生，受激发射和受激吸收发生的概率相同。用 N_c 和 N_v 分别表示高、低能带上的电子密度。当 $N_c < N_v$ 时，受激吸收过程大于受激发射，增益系数 $g<0$，只能出现普通的荧光，光子被吸收的多，发射的少，光场减弱。若注入电流增加到一定值后，使 $N_c > N_v$，增益系数 $g>0$，受激发射占主导地位，光场迅速增强，此时的 PN 结区成为对光场有放大作用的区域（称为有源区），从而形成受激发射，如图 4-4b 和图 4-3 所示。

半导体材料在通常状态下，总是 $N_c < N_v$，因此称 $N_c > N_v$ 的状态为粒子数反转。使有源区产生足够多的粒子数反转，这是使半导体激光器产生激光的首要条件。

半导体激光器产生激光的第 2 个条件是半导体激光器中必须存在光学谐振腔，并在谐振腔里建立起稳定的振荡。有源区里实现了粒子数反转后，受激发射占据了主导地位，但是，激光器初始的光场来源于导带和价带的自发辐射，频谱较宽，方向也杂乱无章。初始光场在谐振腔体内移动 δx，获得了增益 δg，如图 4-8b 所

示。为了得到单色性和方向性好的激光输出，必须构成光学谐振腔。在问 3－4 中，我们已讨论了法布里—珀罗谐振腔的构成和工作原理。在半导体激光器中，用晶体的天然解理面构成法布里—珀罗谐振腔，如图 4-8 所示。要使光在谐振腔里建立起稳定的振荡，必须满足一定的相位条件和阈值条件。相位条件使谐振腔内的前向和后向光波发生相干，阈值条件使腔内获得的光增益 $g(\nu)$ 正好与腔内损耗相抵消，此时的纵模就变成发射主模，如图 4-9 所示。谐振腔里存在着损耗，如镜面的反射损耗、工作物质的吸收和散射损耗等。只有谐振腔里的光增益和损耗值保持相等，并且谐振腔内的前向和后向光波发生相干时，才能在谐振腔的两个端面输出谱线很窄的相干光束。前端面发射的光约有 50% 耦合进入光纤，如图 4-8a 所示。后端面发射的光，由封装在内的光检测器接收变为光电流，经过反馈控制回路，使激光器输出功率保持恒定。

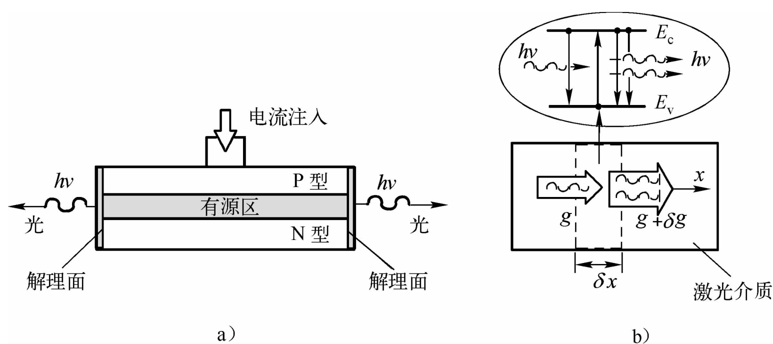


图 4-8　半导体激光器（LD）

a）LD 相当于法布里–珀罗（F－P）谐振腔　b）初始光场在谐振腔内移动 δx 获得增益 δg

图 4-10 是对激光器起振阈值条件的简化描述，由图可见，只有当泵浦电流达到阈值时，高、低能带上的电子密度差(N_c-N_v)才达到阈值$(N_c-N_v)_{th}$，此时就产生稳定的连续输出相干光。当泵浦超过阈值时，(N_c-N_v) 仍然维持$(N_c-N_v)_{th}$，因为 g_{th}必须保持不变，所以多余的泵浦能量转变成受激发射，使输出功率增加。

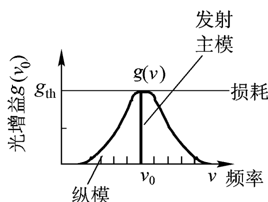


图 4-9　激光器增益谱和损耗曲线
（阈值增益为两曲线相交时的增益值）

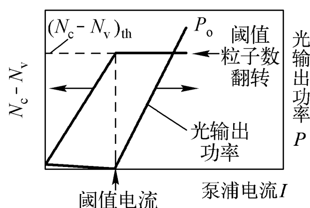


图 4-10　激光器起振阈值
条件的简化描述

4-6　LED 和 LD 的波长特性有何不同?

激光器的波长特性可以用中心波长、光谱宽度以及光谱线数三个参数来描述。光谱范围内辐射强度最大值所对应的波长叫中心波长 λ_0。光谱范围内辐射强度最大值下降 50% 处所对应波长的宽度叫做谱线宽度 $\Delta\lambda$，有时简称为线宽。图 4-11 为激光器的典型光谱特性，为了便于比较，在图中也给出了 LED 的光谱特性。

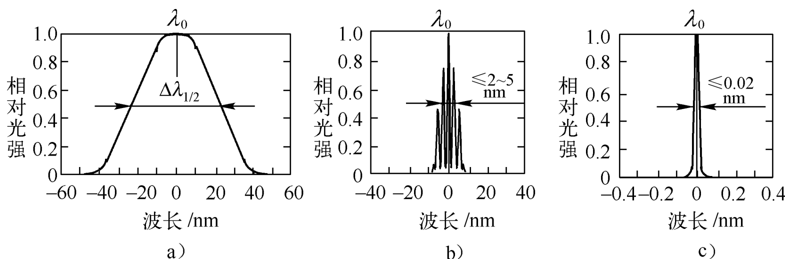


图 4-11　LED 和 LD 的光谱特性
a）LED 的光谱特性　b）多模 LD 的光谱特性　c）单模 LD 的光谱特性

LED 本质上是非相干光源，它的发射光谱就是半导体材料导带和价带的自发辐射谱线，所以谱线较宽。对于用 GaAlAs 材料制作的 LED，发射光谱宽度约为 30 ~ 50 nm，而对长波长 InGaAsP 材料制作的 LED，发射谱线为 60 ~ 120 nm。因为 LED 的光谱很宽，所以光在光纤中传输时，色散较严重，这对光纤通信非常不利。

多模激光器指的是多纵模或多频激光器，模间距为 0. 13 ~ 0. 9 nm。

通常高速传输系统用的半导体激光器的频谱宽度为 5 nm。

单模激光器的频谱宽度因为很窄，所以称为线宽，它与有源区的设计密切相关。

4-7　什么是分布反馈（DFB）激光器

在光纤通信网络中，最常用的激光器是分布反馈（DFB）激光器，它是一种单纵模或单频半导体激光器，单频激光器是指半导体激光器的频谱特性只有一个纵模（谱线）的激光器，它可以工作在光纤最小损耗窗口（1. 55 μm）的第三代光纤系统中。

图 4-12 为 DFB 激光器的结构和典型的输出频谱。在普通 LD 中，只有有源区在其界面提供必要的光反馈；但在 DFB 激光器内，光的反馈就像 DFB 名称所暗示的那样，不仅在界面上，而且分布在整个腔体长度上。这是通过在腔体内构成折射率周期性变化的衍射光栅实现的。在 DFB 激光器内，除有源区外，还在其上并紧靠它增加了一层导波区。该区的结构是波纹状的电介质光栅，它的作用是对从有源区辐射进入该区的光波产生部分反射。从有源区辐射进入导波区是在整个腔体长度上，所以可认为波纹介质也具有增益，因此部分反射波获得了增益。

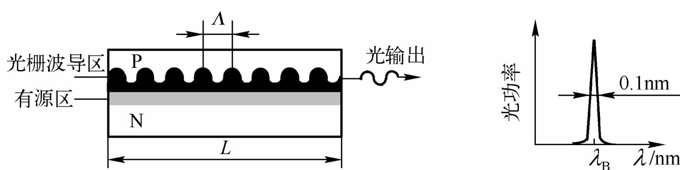


图 4-12　DFB 激光器结构及其工作原理

4-8　什么是光的衍射？什么是衍射光栅？

光的衍射是指直线传播的光实际上绕射到障碍物背后去的一种现象。这是波的一种共性，例如用防洪堤围成一个入口很窄的渔港，港外的水波会从入口处绕到堤内来传播，这种现象就是一种衍射

现象。

波的一个重要特性是它的衍射效应，例如声波在传播过程中可以弯曲和偏转，光波也有类似的特性，例如一束光在遇到障碍物时也弯曲传播，尽管这种弯曲很小。图 4-13a 表示准直光通过孔径为 a 的小孔时产生光的偏转，产生明暗相间的光强花纹，称为弥散（爱里）环，这种现象称为光的衍射，光强的分布图案称为衍射光斑。显然，衍射光束的光斑与光通过小孔时产生的几何阴影并不相符。

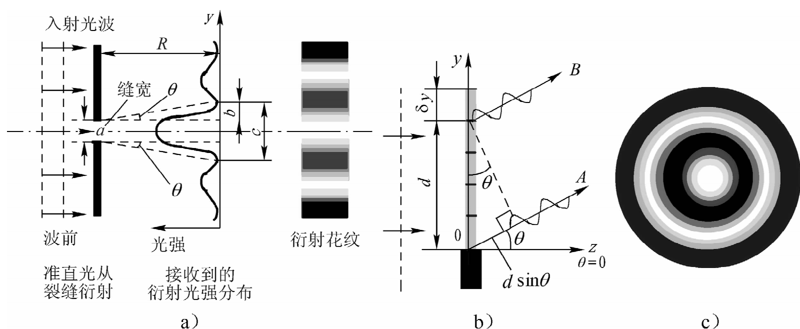


图 4-13　光的衍射

a）裂缝衍射　b）裂缝 a 可分成 N 个孔径为 δy 的点光源　c）小孔衍射光斑

我们可以把裂缝宽度 a 划分成 N 个相干的光源，每个长 $\delta y = a/N$，如果 N 足够大，就可把该光源看做点光源，如图 4-13b 所示。

小孔衍射的光斑是明暗相间的衍射花纹，如图 4-13c 所示。明亮区对应从裂缝上发出的所有球面波的相长干涉，黑暗区对应它们的相消干涉。

最简单的衍射光栅是在不透明材料上具有一排周期性分布的裂缝，如图 4-14a 所示。入射光波在一定的方向上被衍射，该方向与波长和光栅特性有关。图 4-14b 表示光通过有限数量的裂缝后，接收到的衍射光强分布。由图可见，沿一定的方向（θ）具有很强的衍射光束，根据它们出现位置的不同分别标记为零阶（中心）及其分布在其两侧的一阶和二阶等。假如光通过无限数量的裂缝，则衍射光波具有相同的强度。事实上，任何折射率的周期性变化，都可以作为

衍射光栅。

我们假定入射光束是平行波，因此裂缝变成相干光源。并假定每个裂缝的宽度 a 比把裂缝分开的距离 d 更小，如图 4-14a 所示。从两个相邻裂缝以角度 θ 发射的光波间的路径差是 $d\sin\theta$，很显然，所有这些从一对相邻裂缝发射的光波相长干涉的条件是路径差 $d\sin\theta$ 一定是波长的整数倍，即

$$d\sin\theta = m\lambda \qquad m=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \cdots \tag{4-4}$$

很显然，相消干涉的条件是路径差 $d\sin\theta$ 一定要等于半波长的整数倍，即

$$d\sin\theta = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \quad m=0,\pm1,\pm2,\cdots$$

式（4-4）就是著名的衍射方程，有时也称为布拉格衍射条件，式中 m 值决定衍射的阶数，$m=0$ 对应零阶衍射，$m=\pm1$ 对应一阶。当 $a<d$ 时，衍射光束的幅度被单个裂缝的衍射幅度调制，如图 4-14b 所示。由式（4-4）可见，不同波长的光对应不同长度的距离 d，因此，衍射光栅可以把不同波长的入射光分开，它已被广泛应用到光谱分析仪中。

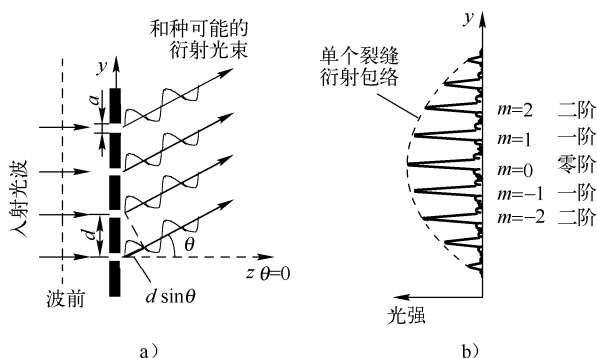


图 4-14　衍射光栅

a）有限裂缝衍射光栅　b）接收到的衍射光强分布

光栅由周期性变化的反射表面构成，这可通过在金属薄膜上刻蚀平行的凹槽得到。没有刻蚀表面的反射可作为同步的二次光源，

它们发射的光波沿一定的方向干涉就产生零阶、一阶和二阶等衍射光束。

4-9　如何构成一个波长可调激光器?

波长可调谐半导体激光器如图 4-15 所示，一个简单的构成方式是从半导体激光器耦合出部分光能，到外部衍射光栅，如图 4-15a 所示。为了提供较强的耦合，减小该界面对来自衍射光的反射，在面对衍射光栅的界面上镀抗反射膜。这种激光器是外腔半导体激光器。通过简单地旋转光栅，可在较宽范围内对波长实现调谐（典型值为 50 nm）。这种激光器的缺点是不能单片集成在一起。

为了解决激光器的稳定性和调谐性不能同时兼顾的矛盾，科学家们设计了多腔 DFB 激光器。图 4-15b 表示这种激光器的典型结构，它包括了三腔，即有源腔、相位控制腔和布拉格反射腔，每腔独立地注入电流偏置。注入布拉格腔的电流改变感应载流子的折射率 n，从而改变布拉格波长（$\lambda_B = 2n\Lambda$）。注入相位控制腔的电流也改变了该腔的感应载流子折射率，从而改变了 DBR 的反馈相位实现波长锁定。通过控制注入三腔的电流，激光器的波长可在 5 ~7 nm 范围内连续可调。因为该激光器的波长由内部布拉格区的衍射光栅决定，所以工作稳定。这种多腔分布布拉格反射激光器对于多信道 WDM 通信系统和相干通信系统是非常有用的。

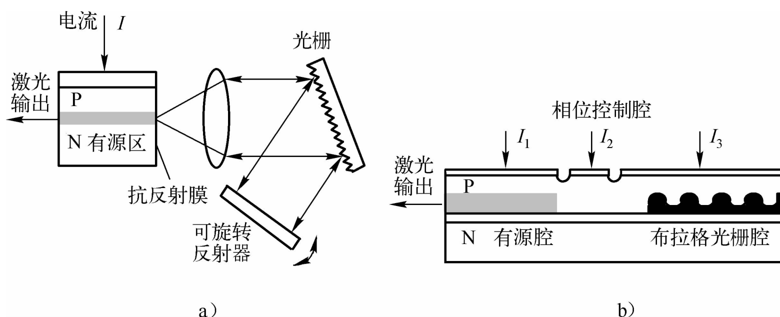


图 4-15　波长可调谐耦合腔半导体激光器构成

a）外腔激光器　b）多腔分布布拉格（DBR）激光器

4-10　模拟强度光调制和数字强度光调制有何不同?

模拟强度光调制是模拟电信号线性地直接调制光源（LED 或 LD）的输出光功率，如图 4-16a 所示。当调制信号是数字信号时，调制原理与模拟强度调制相同，只要用脉冲波取代正弦波即可，如图 4-16b 所示。但是工作点的选择不同，模拟强度调制选在 $P-I$ 特性的线性区；但是数字调制选在阈值点。

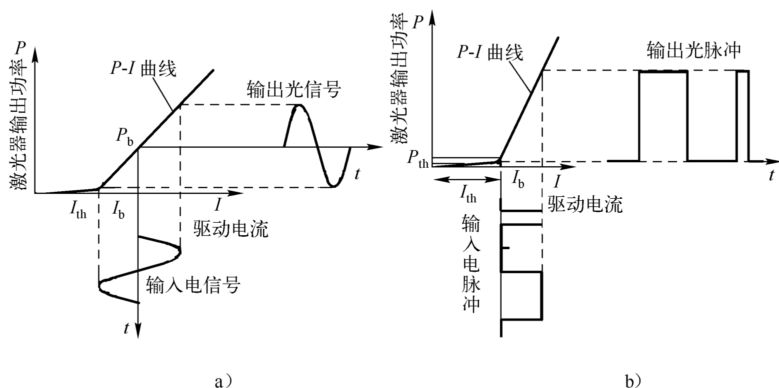


图 4-16　LD 的强度调制
a）模拟强度调制　b）数字强度调制

第 5 章　光纤通信光接收机

5-1　光接收机的作用是什么?

发射机发射的光信号经光纤传输后，不仅幅度衰减了，而且脉冲波形也展宽了。光接收机的作用就是检测经过传输后的微弱光信号，并放大、整型、再生成原输入信号。它的主要器件是利用光电效应把光信号转变为电信号的光探测器。对光探测器的要求是灵敏度高、响应快、噪声小、成本低和可靠性高，并且它的光敏面应与光纤芯径匹配。用半导体材料制成的光敏探测器正好满足这些要求。

5-2　光探测器的作用和原理是什么?

光探测过程的基本机理是光吸收。假如入射光子的能量 $h\nu$ 超过禁带能量 E_g，只有几微米宽的耗尽区每次吸收一个光子，将产生一个电子－空穴对，发生受激吸收，如图 4-4c 和图 5-1a 所示。在 PN 结施加反向电压的情况下，受激吸收过程生成的电子－空穴对在电场的作用下，分别离开耗尽区，电子向 N 区漂移，空穴向 P 区漂移，空穴和从负电极进入的电子复合，电子则离开 N 区进入正电极。从而在外电路形成光生电流 I_P。当入射功率变化时，光生电流也随之线性变化，从而把光信号转变成电流信号。

光敏二极管的本征响应带宽由载流子在电场区的渡越时间 t_{tr} 决定，而载流子的渡越时间与电场区的宽度 W 和载流子的漂移速度 V_d 有关。由于载流子渡越电场区需要一定的时间 t_{tr}，对于高速变化的光信号，光敏二极管的转换效率就相应降低。

定义光敏二极管的本征响应带宽 Δf 为，在探测器入射光功率相同的情况下，接收机输出高频调制响应与低频调制响应相比，电信

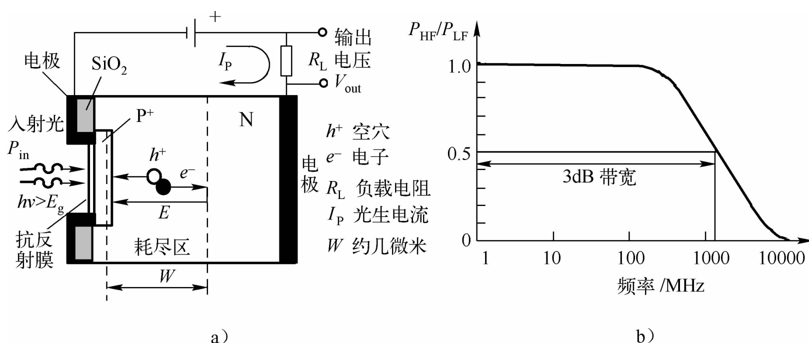


图 5-1　PN 结光探测器原理说明

a）反向偏置的 PN 结，在耗尽区产生线性变化的光场，当光入射时，光生电子空穴对分别向 N 区和 P 区漂移，在外电路产生光生电流　b）探测器的频率响应带宽

号功率下降 50%（3 dB）时的频率，如图 5-1b 所示，Δf 与上升时间 τ_{tr} 成反比

$$\Delta f_{3dB} = \frac{0.35}{\tau_{tr}} \tag{5-1}$$

式中，上升时间 τ_{tr} 定义为输入阶跃光脉冲时，探测器输出光电流最大值的 10% 上升到 90% 所需的时间。

5-3　什么是 PIN 光探测器？

简单的 PN 结光敏二极管具有两个主要的缺点：一是它的结电容或耗尽区电容较大，*RC* 时间常数较长，不利于高频接收；二是它的耗尽层宽度最大也只有几微米，此时长波长的穿透深度比耗尽层宽度 *W* 还大，所以大多数光子没有被耗尽层吸收，而是进入不能将电子空穴对分开的电场为零的 N 区，因此长波长的量子效率很低。为了克服以上问题，人们采用 PIN 光敏二极管。

PIN 二极管与 PN 二极管的主要区别是：在 P^+ 和 N^- 之间加入一个在硅（Si）中掺杂较少的 I 层，作为耗尽层，如图 5-2a 所示。I 层的宽度较宽，为 5 ~ 50 μm，可吸收绝大多数光子，使量子效率提高。

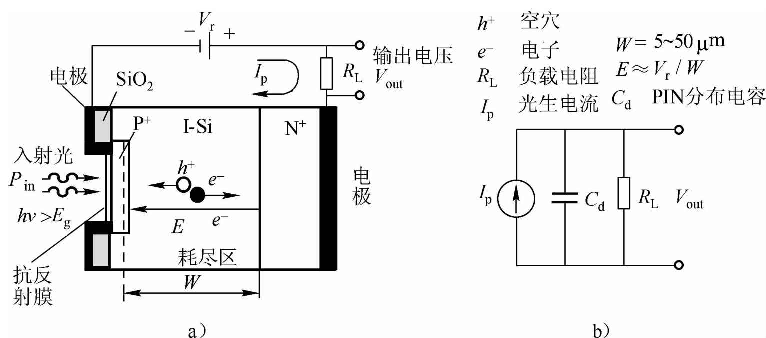


图 5-2　PIN 光敏二极管

a）PIN 工作原理图　b）PIN 等效电路

注：反向偏置的 PN 结，在耗尽区产生不变光场，因耗尽区较宽，可吸收绝大多数光生电子空穴，使量子效率提高

5-4　什么是雪崩光敏二极管（APD）?

雪崩光敏二极管（APD）是一种内部提供增益的光敏二极管。其基本原理是光生的电子－空穴对经过 APD 的高电场区时被加速，从而获得足够的能量，它们在高速运动中与 P 区晶格上的原子碰撞，使晶格中的原子电离，从而产生新的电子－空穴对，如图 5-3 所示。这种通过碰撞电离产生的电子－空穴对，称为二次电子－空穴对。新

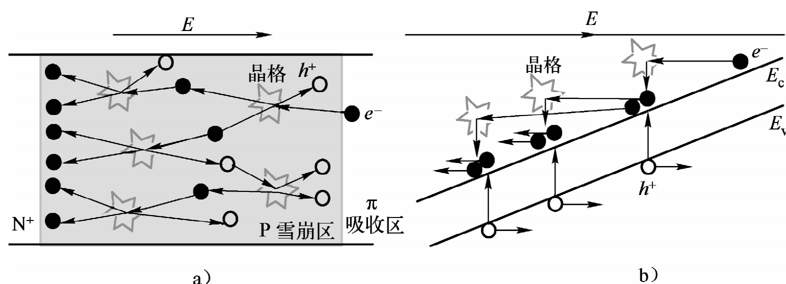


图 5-3　APD 雪崩倍增原理图

a）离子碰撞过程释放电子空穴对，导致雪崩　b）具有能量的导带电子与晶格碰撞，转移该电子动能到一个原子价的电子上，并激发它到导带上

产生的二次电子和空穴在高电场区里运动时又被加速，又可能碰撞别的原子，这样多次碰撞电离的结果，使载流子迅速增加，反向电流迅速加大，形成雪崩倍增效应。APD 就是利用雪崩倍增效应使光电流得到倍增的高灵敏度探测器。

5-5　什么是波导光探测器（WG－PD）?

按光的入射方式，光探测器可以分为面入射光探测器和边耦合光探测器，图 5-4a 和图 5-4b 表示的普通 PIN 光敏二极管是面入射光探测器，图 5-4c 和图 5-4d 分别是波导光探测器（WG－PD）和行波光探测器（TW－PD），它们是边耦合探测器。

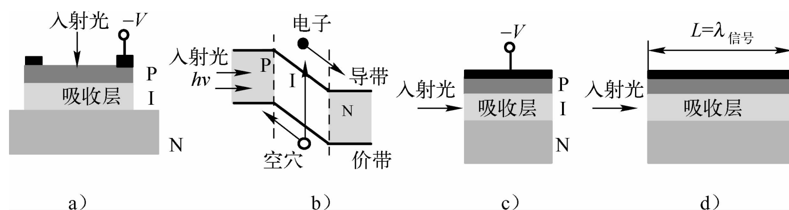


图 5-4　面入射光探测器和边耦合光探测器（WG－PD、TW－PD）的比较
a）PIN－PD　b）PIN 探测器能带图　c）WG－PD　d）TW－PD

在面入射光探测器中，光从正面或背面入射到光探测器的光吸收层中，产生电子－空穴对，并激发价带电子跃迁到导带，产生光电流，如图 5-4a 和图 5-4b 所示。所以，在面入射光探测器（如一般的 PIN 光探测器（PIN－PD）中，光行进方向与载流子的渡越方向平行。PIN 光探测器的响应速度受到 PN 结 *RC* 数值、I 吸收层厚度和载流子渡越时间等的限制。在正面入射光探测器中，光吸收区厚度一般在 2～3μm，而 PN 结直径一般大于 20μm。这样最高光响应速率小于 20Gbit/s。为此，提出了高速光探测器实现的解决方案——边耦合光探测器。

在（侧）边耦合光探测器中，光行进方向与载流子的渡越方向互相垂直，如图 5-4c 和图 5-4d 所示，吸收区长度沿光的行进方向，吸收效率提高了；而载流子渡越方向不变，渡越距离和所需时间不

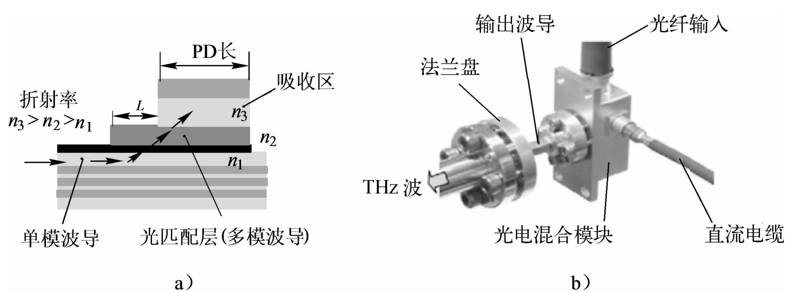
变，这样就很好地解决了吸收效率和电学带宽之间对吸收区厚度要求的矛盾。边耦合光探测器比面入射光探测器可以获得更高的 3 dB 响应带宽。边耦合光探测器分为波导型光探测器（WG – PD）和行波型光探测器（TW – PD）。

面入射光探测器的固有弱点是量子效率和响应速度相互制约，一方面可以采用减小其结面积的方法来提高它的响应速度，但是这会降低器件的耦合效率；另一方面也可以通过减小本征层（吸收层）的厚度来提高器件的响应速度，但是这会减小光吸收长度，降低内量子效率，因此这些参数需折中考虑。

波导光探测器（WG – PD）正好解除了 PIN 光探测器的内量子效率和响应速度之间的制约关系，极大地改善了其性能，在一定程度上满足了光纤通信对高性能光探测器的要求。

图 5-4c 为 WG – PD 的结构图，光垂直于电流方向入射到光探测器的光波导中，然后在波导中传播，传播过程中光不断被吸收，光强逐渐减弱，同时激发价带电子跃迁到导带，产生光生电子 – 空穴对，实现了对光信号的探测。在 WG – PD 结构中，吸收系数是本征层厚度的函数，选择合适的本征层厚度可以得到最大的吸收系数。其次，WG – PD 的光吸收是沿波导方向进行的，其光吸收长度远大于传统型光探测器。WG – PD 的吸收长度是光探测器波导的长度，一般可大于 10 μm，而传统型光探测器的吸收长度是 InGaAs 本征层的厚度，仅为 1 μm。所以 WG – PD 结构的内量子效率高于传统型结构 PD。另外，WG – PD 还很容易与其他器件集成。

但是，和面入射光探测器相比，WD – PD 的光耦合面积非常小，导致光耦合效率较低，同时也增加了和光纤耦合的难度。为此，可采用分支波导结构增加光耦合面积，如图 5-5a 所示。在图 5-5a 的分支波导光探测器的结构中，光进入折射率为 n_1 的单模波导，当传输到 n_2 光匹配层的下面时，由于 $n_2 > n_1$，所以光向多模波导匹配层偏转，又因 $n_3 > n_2$，所以光就进入 PD 的吸收层，转入光生电子的过程。分支波导光探测器各层折射率的这种安排正好和渐变多模光纤（见问 2 – 7）的折射率结构相反，渐变多模光纤是把入射光局限在纤芯内传输，很容易理解，分支波导光探测器就应该把光从入射波导中扩散出去。在这种波导结构中，永远不会发生全反射现象。



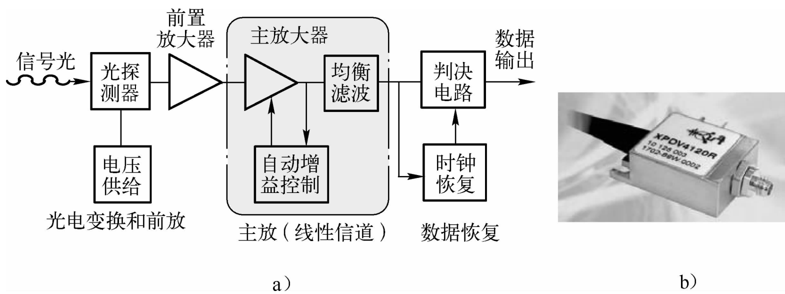
a）　　b）

图 5-5　增加光耦合面积的分支波导探测器

a）单模波导光经过光匹配层进入 PD 吸收层　b）高速光探测器光电混装模块

5-6　数字光接收机主要由哪几部分组成？各有什么作用？

数字光接收机的原理由三部分组成，即由光电探测和前置放大器、主放大（线性信道）以及数据恢复部分组成。



a）　　b）

图 5-6　数字光接收机

a）构成图　b）100 GHz 波导光探测器

接收机前端的光探测器将微弱的光信号转换为电信号，紧随其后的低噪声前置放大器，放大光敏二极管产生的微弱电信号，以供主放大器进一步放大和处理。

线性放大器由主放大器、均衡滤波器和自动增益控制电路组成。自动增益控制电路的作用是在接收机平均入射光功率很大时把放大器

的增益自动控制在固定的输出电平上。低通滤波器的作用是减小噪声，均衡整型电压脉冲，避免码间干扰。我们知道，接收机的噪声与其带宽成正比，使用带宽Δf小于比特率B的低通滤波器可降低接收机噪声（通常$\Delta f = B/2$）。因为接收机其他部分具有较大的带宽，所以接收机带宽将由低通滤波器带宽来决定。此时，由于$\Delta f < B$，所以滤波器使输出脉冲发生展宽，使前后码元波形互相重叠，在检测判决时就有可能将“1”码错判为“0”码或将“0”码错判为“1”码，这种现象就叫做码间干扰。均衡滤波的作用就是将输出波形均衡成具有升余弦频谱函数特性，做到判决时无码间干扰。因为前置放大器、主放大器以及均衡滤波电路起着线性放大的作用，所以有时也称为线性信道。

光接收机的数据恢复部分包括判决电路和时钟恢复电路，它的任务是把均衡器输出的升余弦波形信号恢复成数字信号。

5-7　为什么接收机前置放大器特别重要？

接收机的前端是光探测器，它是实现光电转换的关键器件，直接影响光接收机的灵敏度。紧接着就是低噪声前置放大器，其作用是放大光敏二极管产生的微弱电信号，以供主放大器进一步放大和处理。接收机不是对任何微弱信号都能正确接收的，这是因为信号在传输、检测及放大过程中总会受到一些干扰，且不可避免地要引进一些噪声。虽然来自环境或空间无线电波及周围电气设备所产生的电磁干扰，可以通过屏蔽等方法减弱或防止，但随机噪声是接收系统内部产生的，是信号在检测、放大过程中引进的，人们只能通过电路设计和工艺措施尽量减小它，却不能完全消除它。虽然放大器的增益可以做得足够大，但在弱信号被放大的同时，噪声也被放大了，当接收信号太弱时，必定会被噪声淹没。前置放大器在减少或防止电磁干扰和抑制噪声方面起着特别重要的作用，所以精心设计前置放大器就显得特别重要。

5-8　光接收机中存在哪些噪声？什么是信噪比？

由于电子在光敏二极管负载电阻R_L上随机热运动，即使在外加

电压为零时，也产生电流的随机起伏。这种附加的噪声成分就是热噪声电流。

光生电流是一种随机产生的电流，这种无规则的起伏就是散粒噪声，散粒噪声是由光探测器本身引起的，它围绕着一个平均统计值而起伏。

光接收机除散粒噪声和热噪声这两种基本的噪声外，还有激光器引起的强度噪声。半导体激光器输出的强度、相位和频率，即使在恒流偏置时也总是在变化，从而形成噪声。半导体激光器的两种基本噪声是自发辐射噪声和电子－空穴复合噪声。在半导体激光器中，噪声主要由自发辐射构成。每个自发辐射光子加到受激发射建立起的相干场中，因为这种增加的信号相位是不定的，于是随机地干扰了相干场的相位和幅值。

信噪比（SNR）为平均信号功率和噪声功率之比，它决定了光接收机的性能。考虑到电功率与电流的平方成正比，这时 SNR 可由下式给出：

$$\mathrm{SNR} = I_{\mathrm{P}}^2/\sigma^2 = \frac{R^2 P_{\mathrm{in}}^2}{\sigma_{\mathrm{T}}^2 + \sigma_{\mathrm{s}}^2} \tag{5-2}$$

式中，I_{P}是光生信号电流，其值 $I_{\mathrm{P}} = RP_{\mathrm{in}}$，这里 R 是探测器的响应度，P_{in}是入射信号光功率，σ_{T}^2 是均方热噪声电流，σ_{s}^2 是均方散粒噪声电流，其值分别为

$$\sigma_{\mathrm{T}}^2 = (4k_{\mathrm{B}}T/R_{\mathrm{L}})\Delta f \tag{5-3}$$

$$\sigma_{\mathrm{s}}^2 = 2qI_{\mathrm{P}}\Delta f \tag{5-4}$$

式中，Δf 是接收机带宽；q 是电子电荷；k_{B}是玻尔兹曼常数；T 是热力学温度；R_{L}是光探测器负载电阻。

SNR 可用单个比特时间内（即“1”码内）接收到的平均光子数 N_{p} 表示。当 PIN 接收机受限于散粒噪声时，SNR 可用简单的表达式表示

$$\mathrm{SNR} = \eta N_{\mathrm{P}} \tag{5-5}$$

式中，η 是量子效率；N_{P}是“1”码中包含的光子数。在散粒噪声受限系统中，$N_{\mathrm{P}} = 100$ 时，SNR = 20 dB。相反，在热噪声受限系统中，几千个光子才能达到 20 dB 的信噪比。

5-9　什么是比特误码率（BER）？通常数字光接收机要求的 BER 是多少？接收机灵敏度的定义是什么？

数字接收机的性能指标由比特误码率（BER）决定，BER 定义为码元在传输过程中出现差错的概率，工程中常用一段时间内出现误码的码元数与传输的总码元数之比来表示。例如，$BER=10^{-6}$，表示每传输百万比特只允许错 2 比特；如 $BER=10^{-9}$，则表示每传输 10 亿比特只允许错 1 比特。通常，数字光接收机要求 $BER\leqslant10^{-9}$。此时，接收机灵敏度定义为保证比特误码率为10^{-9}时，要求的最小平均接收光功率（$\bar{P}_{rec}$）。假如一个接收机用较少的入射光功率就可以达到相同的性能指标，那么我们说该接收机更灵敏些。影响接收机灵敏度的主要因素是各种噪声。

5-10　监测光纤通信系统性能好坏通常采用什么最直观、最简单的方法？

在实验室观察码间干扰、判断系统性能好坏的最直观、最简单的方法是眼图分析法。将均衡滤波器输出的随机脉冲信号输入到示波器的 Y 轴，用时钟信号作为外触发信号，就可以观察到眼图，如图 5-7 所示。眼图的张开度受噪声和码间干扰的影响，当输出端信噪比很大时，张开度主要受码间干扰的影响。因此，观察眼图的张开度就可以估计出码间干扰的大小，这给均衡电路的调整提供了简单而适用的观测手段。

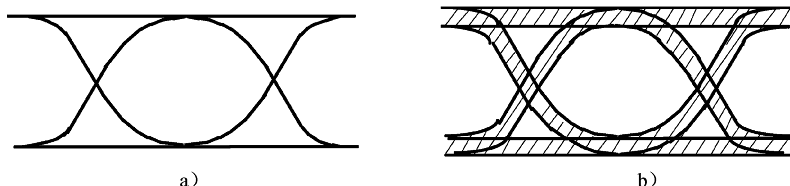


图 5-7　NRZ 码数字光接收机眼图
a）理想的眼图　b）因噪声恶化的眼图

5-11　什么是相干探测？为什么要用相干探测？

过去，几乎所有实用化的光纤通信系统都采用非相干的强度调制——直接检测（IM/DD）方式，这类系统成熟、简单、成本低、性能优良，已经在电信网中获得了广泛的应用，并仍将继续扮演主要的角色。然而，这种 IM/DD 方式没有利用光载波的相位和频率信息，无法像传统的无线电通信那样实现外差检测，从而限制了其性能的进一步改进和提高。

IM/DD 方式是用电子数据脉冲直接调制光载波的强度，在接收端，光信号被光敏二极管直接探测，从而恢复最初的数字信号。相干检测系统，就像传统的无线电和微波通信一样，用光载波的频率或相位发送信息，在接收端，使用外差检测技术恢复原始的数字信号。因为光载波相位在这种方式中扮演着重要的角色，所以称为相干通信，基于这种技术的光纤通信系统称为相干通信系统。

相干检测可使接收机灵敏度提高，与 IM/DD 系统相比可以改进 20 dB，从而在相同发射机功率下，允许传输距离增加 100 km；另外使用相干检测也可以有效地利用光纤带宽，因为可以使波分复用（WDM）各载波的波长间距减小。

在原理上，激光外差检测与无线电外差接收机的相似，都是基于无线电波或光波的相干性和检测器的平方律特性的检测。

相干光波系统是信号光在接收端入射到光探测器之前，用另外一个称为本地振荡器产生的窄线宽光波与它相干混频，如图 5-8 所示，光探测器的输出是一个微波中频信号，典型值为 1 ~ 5 GHz，然后再把该中频信号转变为基带信号。

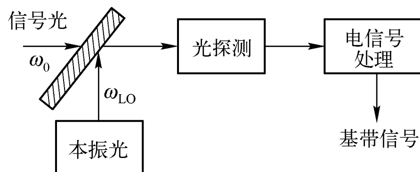


图 5-8　相干检测原理框图

对于外差检测接收机，用单个比特时间内（即“1”码内）接收到的平均光子数 N_p 表示的 SNR 为

$$\mathrm{SNR} = 2\eta N_P \tag{5-6}$$

对于直接检测接收机，BER 为10^{-9}时，要求每比特光子数为 $\bar{N}_P \approx 1\,000$。但对于相干检测接收机，$\bar{N}_P < 100$ 是很容易实现的，因为借助增加本振光功率，使散粒噪声占支配地位，其他噪声均可以忽略不计。

第 6 章　光纤通信光中继放大器

6-1　再生中继器的功能和缺点是什么?

任何光纤通信系统的传输距离都受光纤损耗或色散限制，因此，传统的长途光纤传输系统需要每隔一定的距离就增加一个再生中继器，以保证信号的质量。这种再生中继器的基本功能是进行光－电－光转换，并在光信号转换为电信号时进行整型、再生和定时处理，恢复信号形状和幅度，然后再转换回光信号，沿光纤线路继续传输，如图 6-1a 所示。这种方式有许多缺点。首先，通信设备复杂，系统的稳定性和可靠性不高，特别是在波分复用（WDM）通信系统中更为突出，因为每个信道均需要进行波分解复用，然后进行光－电－光转换，经波分复用后再送回光纤信道传输，如图 6-2 所示，所需设备更复杂，费用更昂贵；其次，传输容量受到一定的限制。

6-2　光放大中继器的作用是什么?

光放大中继器的作用是在光路上对光信号进行直接放大，然后再传输，即用一个全光传输中继器代替目前的这种光－电－光再生中继器，如图 6-1b 所示。

科学家们已经发明了几种光放大器，其中掺铒光纤放大器

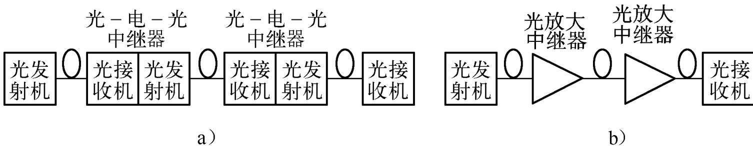


图 6-1　光－电－光中继系统和全光中继系统的比较

a）光－电－光中继系统　b）全光中继系统

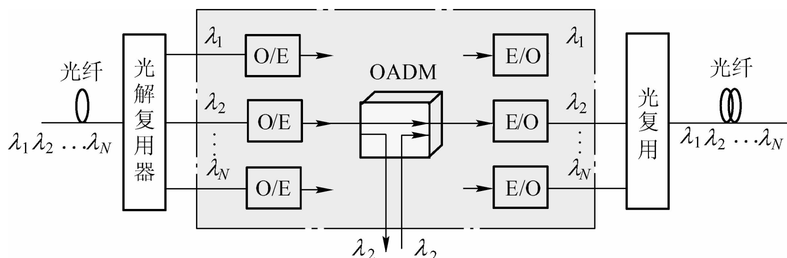


图 6-2　中间含有光分插复用（OADM）器的光－电－光点对点波分复用（WDM）系统结构

（EDFA）、分布光纤拉曼放大器（DRA）和半导体光放大器（SOA）技术已经成熟，众多公司已有商品出售。

6-3　什么是掺铒光纤放大器（EDFA）?

使用铒离子作为增益介质的光纤放大器称为掺铒光纤放大器（EDFA）。铒离子在光纤制作过程中被掺入光纤芯中，使用泵浦光直接对光信号放大，提供光增益。这种放大器的特性（如工作波长、带宽）由掺杂剂决定。掺铒光纤放大器因为工作波长在靠近光纤损耗最小的 1.55 μm 波长区，比其他光放大器更引人注意。

6-4　如何构成一个 EDFA?

图 6-3a 为一个实用光纤放大器的组成框图。光纤放大器的关键部件是掺铒光纤和高功率泵浦源、作为信号和泵浦光复用的波分复用器（WDM），以及为了防止光反馈和减小系统噪声在输入端和输出端使用的光隔离器。

具有增益放大特性的掺铒光纤是光纤放大器的重要组成部分。EDFA 的增益与许多参数有关，如铒离子浓度、放大器长度、芯径以及泵浦光功率等。

对泵浦源的基本要求是高功率和长寿命。可以在几个波长上对掺铒光纤进行有效激励。采用 1 480 nm 的铟镓砷（InGaAs）多量子

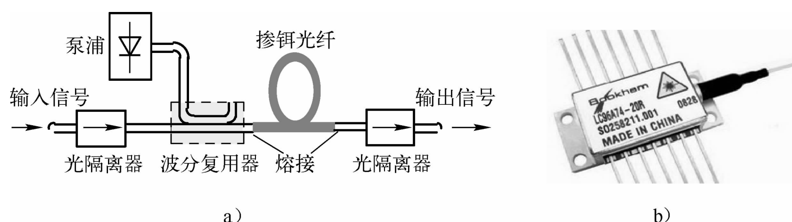


图 6-3　EDFA 组成框图

a）EDFA 组成图　b）980 nm 大功率输出泵浦激光器

阱（MQW）激光泵浦时，EDFA 的输出功率可达 100 mW，该波长的泵浦增益系数较高，而且 EDFA 的带宽与现已实用化的 InGaAs 激光器相匹配。也可以使用980 nm 波长对 EDFA 泵浦，这种泵浦效率高、噪声低，现已广泛使用。

波分复用器把泵浦光与信号光复合。

光隔离器被插入输入端和输出端，其目的是抑制光路中的反射，从而使系统工作稳定可靠、降低噪声。对隔离器的基本要求是插入损耗低、反向隔离度大。

6-5　EDFA 的工作原理是什么?

现在我们具体说明泵浦光是如何将能量转移给信号光的。若掺铒离子的能级图用三能级表示，如图 6-4a 所示，其中能级 E_1代表基态，能量最低；能级 E_2代表中间能级；能级 E_3代表激发态，能量最高。若泵浦光的光子能量等于能级 E_3与 E_1之差，掺杂离子吸收泵浦光后，从基态 E_1跃升至激活态 E_3。但是激活态是不稳定的，激发到激活态能级 E_3的铒离子很快返回到能级 E_2。若信号光的光子能量等于能级 E_2和 E_1之差，则当处于能级 E_2的铒离子返回基态 E_1时就产生信号光子，这就是受激发射，使信号光放大获得增益。图 6-4b 表示 EDFA 的吸收和增益光谱。为了提高放大器的增益，应尽可能使基态铒离子激发到能级 E_3。从以上分析可知，能级 E_2和 E_1之差必须等于需要放大信号光的光子能量，而泵浦光的光子能量也必须保证使铒离子从基态 E_1跃迁到激活态 E_3。

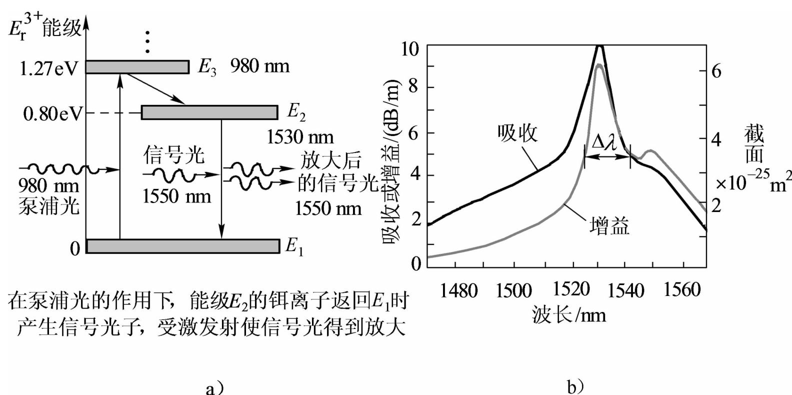


图 6-4　掺铒光纤放大器的工作原理

a）光纤中铒离子的能级图　b）EDFA 的吸收和增益频谱

6-6　EDFA 有哪些应用方式?

EDFA 可作为光发射机功率增强放大器、接收机前置放大器使用，也可以取代光－电－光中继器作为在线光中继器使用。在光纤系统中可延长中继距离，特别适用于长途越洋通信。在公用电话网和 CATV 分配网中，使用 EDFA 补偿分配损耗，可做到信号无损耗的分配，如图 6-5 所示。

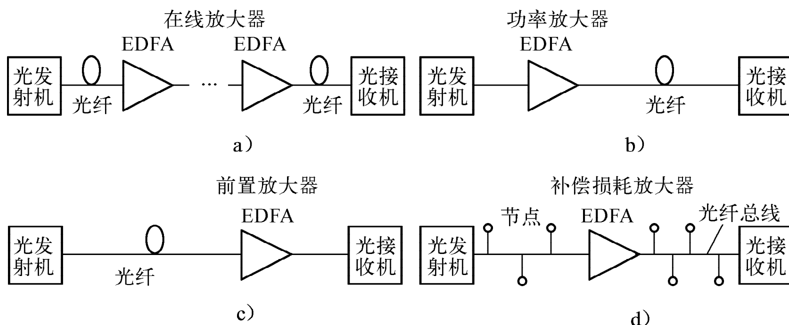


图 6-5　光放大器在光纤通信系统中的应用

a）在线放大器　b）光发射机功率增强器

c）接收机前置放大器　d）在局域网中用于补偿分配损耗

另外，EDFA 可在多信道系统中应用，因为 EDFA 的带宽与半导体光放大器（SOA）的一样都很宽（1 ~ 5 THz），使用光放大器可同时放大多个信道，只要多信道复合信号带宽比放大器带宽小就行。

EDFA 具有相当大的带宽（$\Delta\lambda$ = 20 ~ 40 nm，或 Δf = 2.66 ~ 5.32 THz），这就意味着可用来放大短至皮秒（ps）级的光脉冲而无畸变。从光波系统的应用观点出发，EDFA 的潜在应用在于它们具有放大皮秒级的脉冲而不发生畸变的能力。

6-7　EDFA 有几种泵浦方式？哪种方式转换效率高？哪种噪声系数小？

使用 0.98 μm 和 1.48 μm 的半导体激光泵浦最有效。使用这两种波长的光泵浦 EDFA 时，只用几毫瓦的泵浦功率就可获得高达 30 ~ 40 dB 的放大器增益。采用 1 480 nm 的 InGaAs 多量子阱（MQW）激光泵浦源，其输出功率可达 100 mW，该波长的泵浦增益系数较高。而 980 nm 波长光对 EDFA 泵浦，效率高，噪声低。

图 6-6 为输出信号功率与泵浦功率的关系，由图可见，能量从泵浦光转换成信号光的效率很高，因此 EDFA 很适合作为功率放大器。泵浦光功率转换为输出信号光功率的效率为 92.6%，60 mW 功率泵浦时，吸收效率 =（信号输出功率–信号输入功率）/泵浦功率 = 88%。

图 6-7 为小信号输入时，实际掺铒光纤增益和泵浦功率的关系，1.48 μm 泵浦时的增益系数是 6.3 dB/mW。

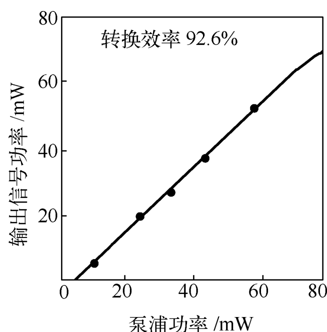


图 6-6　输出信号功率与泵浦功率的关系

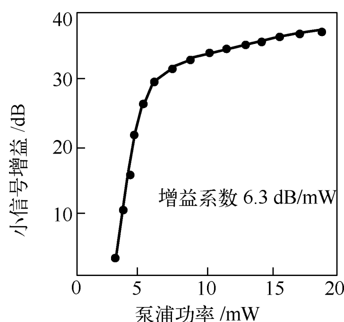


图 6-7　小信号增益与泵浦功率的关系

6-8　EDFA 增益频谱特性如何?

EDFA 的增益频谱曲线形状取决于光纤芯内掺杂剂的浓度。图 6-4b 为纤芯掺锗的 EDFA 的增益频谱和吸收频谱。从图中可知，掺铒光纤放大器的带宽（曲线半最大值带宽）大于 10 nm。

图 6-8 和图 6-9 分别表示将铝与锗同时掺入铒光纤的小信号增益频谱和大信号增益频谱特性，与图 4-4b 比较可见，将铝与锗同时掺入铒光纤可获得比纯掺锗更平坦的增益频谱。

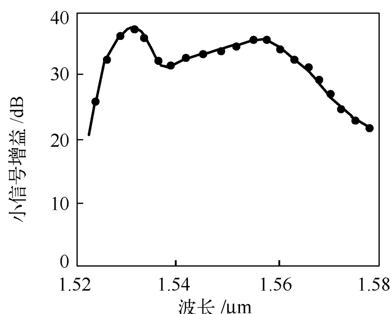


图 6-8　小信号增益频谱

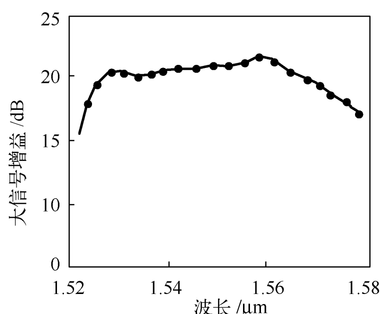


图 6-9　大信号增益频谱

6-9　EDFA 级联需要考虑哪些问题?

光放大器级联可克服长距离通信系统（如海底光缆系统）的光纤损耗，从而省去光信号的周期性光－电－光再生。设计一个在线放大器级联光波系统，要求考虑放大器噪声、光纤色散以及光纤非线性的影响。

放大器噪声以两种方式影响系统性能。首先，级联中的每个放大器产生的放大自发辐射（ASE）噪声，通过剩下的传输线路传送，并被后面的放大器与信号一起放大。该放大后的自发辐射噪声在到达接收机之前累积并影响系统性能。其次，当 ASE 电平逐渐增大时，它开始使光放大器饱和并减小信号增益。其结果是沿传输线路信号功率下降而 ASE 电平上升，在接收端 SNR 甚至下降更多。数值模拟

表明，该系统在一定意义上处于自调整状态，即总功率（信号功率和 ASE 功率之和）维持相对恒定。

由于光纤色散和光纤非线性的累积影响，实际上，实现总传输距离 L_t 超过几千千米的光纤系统是困难的。通常放大器只补偿光纤损耗，那么，在放大器级联的光纤系统中，系统就由色散所限制。

在 WDM 系统的应用中，对 EDFA 性能的要求是相当苛刻的，这是因为单个放大器增益的较小变化，将引起级联放大器总增益的很大变化，即使 0.2 dB 的 EDFA 增益波动，100 个放大器在线级联后，也会产生 20 dB 的增益差，使信道间的功率变化达 100 倍，这在实际应用中是不能接受的。因此 WDM 系统的信道数，不仅受放大器带宽限制，而且也受增益频谱的不平坦限制。因此需要对 EDFA 的增益进行均衡。

6-10　半导体光放大器（SOA）的工作原理是什么？

光放大器通过受激发射放大入射光信号，其机理与激光器相同。光放大器只是一个没有反馈的激光器，其核心是当放大器被光或电泵浦时，使粒子数反转获得光增益，如图 6-10a 所示。

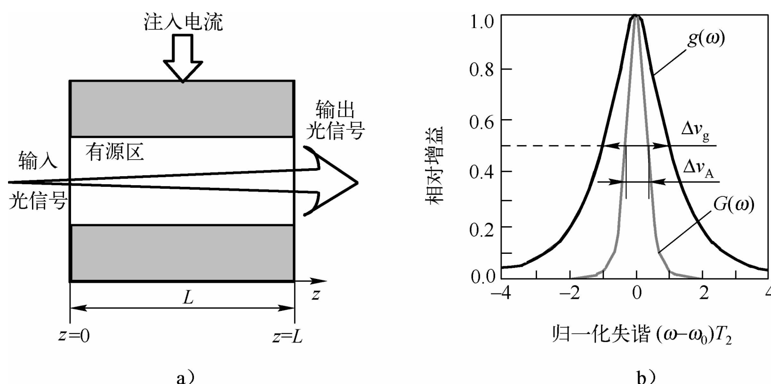


图 6-10　光放大器原理和增益分布曲线

a）行波半导体光放大器　b）光放大器增益分布曲线 $g(\omega)$ 和相应的放大器增益频谱曲线 $G(\omega)$

但是，半导体激光器在解理面存在反射（反射系数约为 32%），具有相当大的反馈。当偏流低于阈值时，它们被作为放大器使用，但是必须考虑在法布里－珀罗（F-P）腔体界面上的多次反射。这种放大器就称为 F-P 放大器。

当 $R_1=R_2$，并考虑到 $\nu=\nu_m$ 时，使用 F-P 干涉理论可以求得该放大器的放大倍数 $G_{FPA}(\nu)$ 为

$$G_{FPA}^{max}(\nu)=\frac{(1-R)^2G(\nu)}{[1-RG(\nu)]^2} \tag{6-1}$$

当入射光信号的频率 $\omega(\nu)$ 与腔体谐振频率中的一个 $\omega_m(\nu_m)$ 相等时，增益 $G_{FPA}(\nu)$ 就达到峰值，当 $\omega(\nu)$ 偏离 ν_m 时，$G_{FPA}(\nu)$ 下降得很快，如图 6-11b 所示。由图可见，当半导体解理面与空气的反射系数 $R=0.32$ 时，F-P 放大器在谐振频率处的峰值最大；反射系数越小，增益也越小；当 $R=0$ 时，就变为行波放大器，其增益频谱特性是高斯曲线。

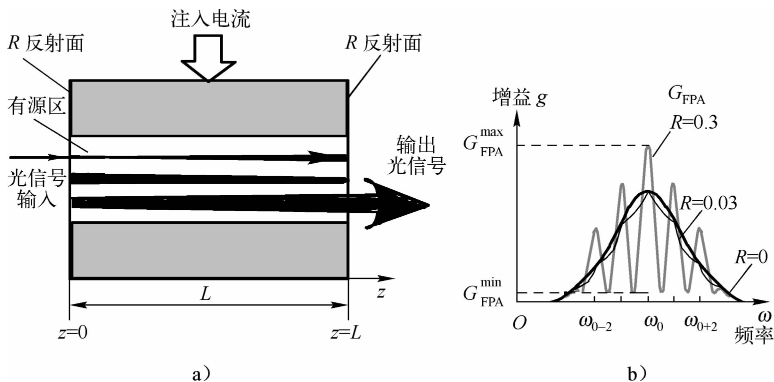


图 6-11　法布里－玻罗（F-P）半导体光放大器（SOA）

a）SOA 的结构和原理图　b）SOA 不同反射系数的增益频谱曲线

由以上的讨论我们知道，增大提供光反馈的 F-P 谐振腔的反射系数 R，可以显著地增加 SOA 的增益，反射系数 R 越大，在谐振频率处的增益也越大。但是，当 R 超过一定值后，光放大器将变为激光器。当 $GR=1$ 时，式（6-1）将变为无限大，此时 SOA 产生激光发射。

6-11　如何使 LD 变为 SOA？

减小 LD 解理端面反射反馈，使 $\sqrt{R_1R_2} < 0.17 \times 10^{-4}$，就可以制出行波半导体光放大器（SOA）。使条状有源区与正常的解理面倾斜或在有源层端面和解理面之间插入透明窗口区，如图 6-12 所示。在图 6-12b 的输出透明窗口区，光束在到达半导体和空气界面前在该窗口区已发散，经界面反射的光束进一步发散，只有极小部分光耦合进薄的有源层。当与抗反射膜一起使用时，反射系数可以小至10^{-4}，从而使 LD 变为 SOA。

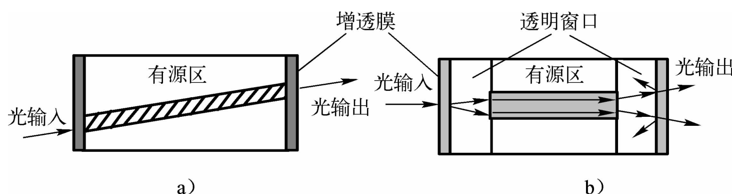


图 6-12　减小反射使 LD 近似变为行波（TW）半导体光放大器（SOA）

a）条状有源区与解理面成倾斜结构　b）窗口解理面结构

6-12　什么是分布式拉曼放大器？有何应用？与 EDFA 比较有何不同？

EDFA 只能工作在 1 530 ~ 1 564 nm 之间的 C 波段，而光纤拉曼放大器则可以工作在光纤的所有工作窗口。因为光纤拉曼放大器的增益频谱只由泵浦波长决定，而与掺杂物的能级电平无关，所以只要泵浦波长适当，就可以在任意波长获得信号光的增益。正是由于光纤拉曼放大器在光纤全波段放大的这一特性，以及可利用传输光纤作在线放大实现光路的无损耗传输的优点，自 1999 年在 DWDM 系统上获得成功应用以来，就立刻再次受到人们的关注。如果用色散补偿光纤作放大介质构成拉曼放大器，那么光传输路径的色散补偿和损耗补偿可以同时实现。光纤拉曼放大器已成功地应用于 DWDM 系统和无中继海底光缆系统中。

与 EDFA 利用掺铒光纤作为它的增益介质不同，分布式光纤拉曼放大器利用系统中的传输光纤作为它的增益介质。研究发现，石英光纤具有很宽的受激拉曼散射增益谱。光纤拉曼放大器基于非线性光学效应的原理，利用强泵浦光束通过光纤传输时产生受激拉曼散射，使组成光纤的石英晶格振动和泵浦光之间发生相互作用，产生比泵浦光波长还长的散射光（$\omega_p - \omega_s$）（斯托克斯光），如图 6-13b 所示。该散射光与波长相同的信号光（$\omega_p - \omega_s$）重叠，从而使弱信号光放大，获得拉曼增益。就石英玻璃而言，泵浦光波长与待放大信号光波长之间的频率差大约为 13 THz，在 1.5 μm 波段，它相当于约 100 nm 的波长差，即有 100 nm 的增益带宽。

采用拉曼放大时，放大波段只依赖于泵浦光的波长，没有像 EDFA 那样的放大波段的限制。从原理上讲，只要采用合适的泵浦光波长，就完全可以对任意输入光进行放大。

分布式光纤拉曼放大器采用强泵浦光对传输光纤进行泵浦，可以采用前向泵浦，也可以采用后向泵浦。图 6-13a 表示采用前向泵浦的分布式光纤拉曼放大器的构成。因后向泵浦减小了泵浦光和信号光相互作用的长度，从而也就减小了泵浦噪声对信号光的影响，所以通常采用后向泵浦，如图 6-14a 所示。

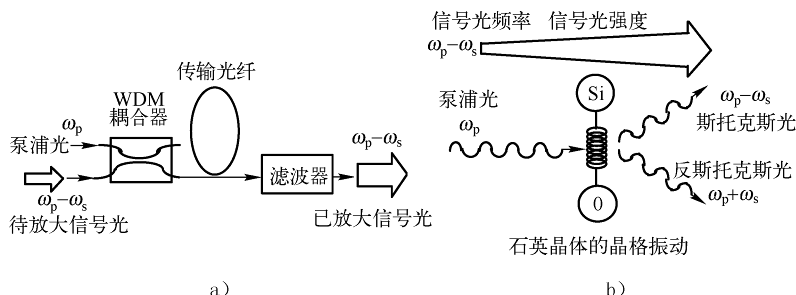


图 6-13 分布式光纤拉曼放大器

a）构成图 b）工作原理图解

强泵浦光经光纤传输时产生受激拉曼散射使泵浦光的能量转移到信号光上

为了使增益曲线平坦，可以改变泵浦光的波长，或者采用多个不同波长的泵浦光。图 6-14b 为用 5 个波长的光泵浦的增益曲线，由

图可见，其合成的增益曲线要平坦得多。

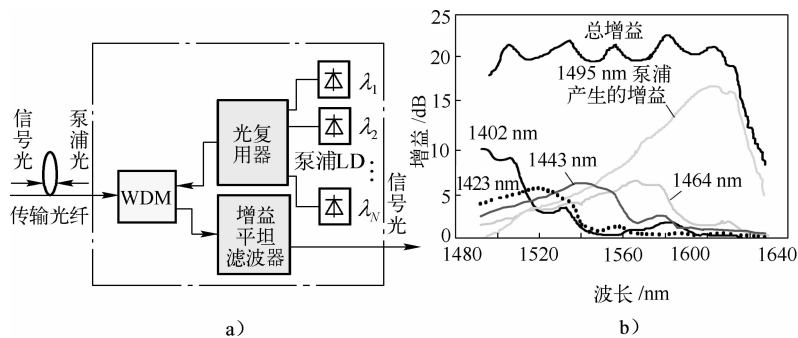


图 6-14　为获得平坦的光增益采用多个波长泵浦

a）后向泵浦分布式拉曼放大器　b）用 5 个波长的光泵浦时的增益曲线

第 7 章　光纤通信系统

至此，我们已介绍了构成光纤传输系统所必须的传输介质——光纤和光缆，用于发射光信号的激光器和光发射机，用于接收光信号的光探测器和光接收机，在传输线路中对光信号进行放大的光放大器，以及光纤传输系统经常用到的光无源器件。本章将对光纤通信系统常碰到的一些问题进行解答。

7-1　为什么要将模拟信号变为数字信号？如何变为数字信号？

光纤通信系统光源的发射功率和线性都有限，因此通常选择二进制脉冲传输，即将连续变化的模拟信号变为用数字“1”或“0”表示的数字信号。因为传输二进制脉冲信号对接收机信噪比（SNR）的要求非常低，对光源的非线性要求也不苛刻。

脉冲编码调制（PCM）是光纤传输模拟信号的基础。解码后的基带信号质量几乎只与编码参数有关，而与接收到的 SNR 关系不大。假如接收到的信号质量不低于一定的误码率，此时解码 SNR 只与编码比特数有关。模拟信号变为数字信号，要通过三个过程，即取样、量化和编码，如图 7-1 所示。

1. 取样

取样是分别以固定的时间间隔 T 取出模拟信号的瞬时幅度值（简称样值）的过程，如图 7-1b 所示。要想实现模拟/数字（A/D）转换，首先要进行取样。

取样定理：若取样频率不小于模拟信号带宽的两倍，则取样后的样值波形只需通过低通滤波器即可恢复出原始的模拟信号波形。

图 7-1b 表示具体的取样过程，由图可见，时间上连续的信号变成了时间上离散的信号，因而给时分多路复用技术奠定了基础。但这种

样值信号，本身在幅度取值上仍是连续的，因此仍属模拟信号，它不仅无法抵御噪声的干扰，而且也不能用有限位数的二进码组加以表示。

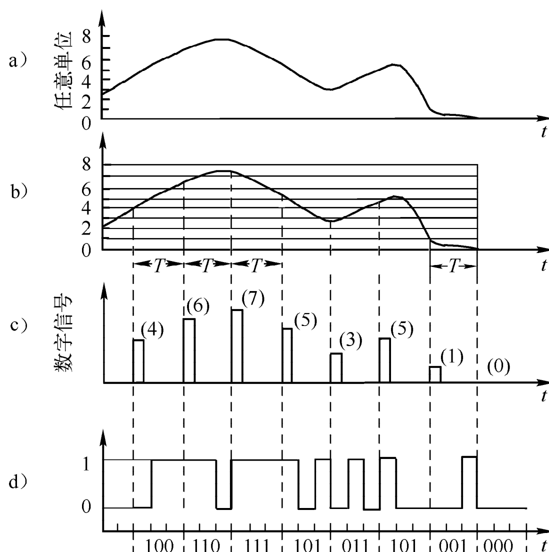


图 7-1　PCM 编码过程

a）模拟信号　b）取样　c）量化　d）编码

2. 量化

所谓量化指的是将幅度为无限多个连续样值变成有限个离散样值的处理过程。

具体来说，就是将样值的幅度变化范围划分成若干个小间隔，每一个小间隔称为一个量化级，当某一样值落入在某一个小间隔内时，可采用“四舍五入”的方法分级取整，近似看成某一规定的标准数值。这样一来，就可以用有限个标准数值来表示样值的大小。当然，量化后的信号和原来的信号是有差别的，称为量化误差，对于图 7-1c 所示的均匀量化，各段的量化误差均为 ±0.5。经过量化后的各样值可用有限个值来表示，进而即可进行编码。

3. 编码

所谓编码指的是用一组组合方式不同的二进制码来替代量化后

的样值信号的处理过程。

我们知道，二进制码与状态“电平值”的关系为

$$N = 2^n \tag{7-1}$$

其中，n 为二进制代码所包含的比特个数；N 为所能表示的不同状态（电平值）。换句话说，当样值信号被划分为 N 个不同的电平幅度时，每一个样值信号需要用

$$n = \log_2 N \tag{7-2}$$

个二进制码元表示。

在图 7-1c 和图 7-1d 中，每一样值划分为 8 种电平幅度（0～7），即 $N=8$，所以每一样值需用 $n=3$ 个码元表示，对于 3 位二进制码而言，与各样值的对应关系如表 7-1 所示。

表 7-1　8 个样值电平值与二进制代码的对应关系

样值电平值	0	1	2	3	4	5	6	7
二进制代码	000	001	010	011	100	101	110	111

至此，将一路模拟信号变成用二进制代码表示的脉冲信号的处理过程就完成了。所产生的信号称为 PCM 信号。而描述所含信息量的大小，可用传输速率来表示，即每秒钟所传输的码元（比特）数目（比特/秒，bit/s）。我国 PCM 通信制式的基础速率计算如下：话音信号的频带为 300～4 000 Hz，取上限频率为 4 000 Hz，按取样定理，取样频率为 $f_s = 8\,\text{kHz}$（即每秒取样 8 000 次），取样时间间隔 $T = 1/f_s = 1/8\,\text{k} = 125\,\mu\text{s}$，在 125 μs 时间间隔内要传输 8 个二进制代码（比特），每个代码所占时间为 $T_b = 125/8\,\mu\text{s}$，所以每路数字电话的传输速率为 $B = 1/T_b = 64\,\text{kbit/s}$（或者 8 bit/每次取样 ×8 000 次/每秒取样）。如果传输 32 路 PCM 电话，则传输速率为 64 kbit/s ×32 = 2 048 kbit/s（也就是 8 bit/每个取样值 ×32 个取样值/每次 ×8 000 次/每秒）。这一速率就是我国 PCM 通信制式的基础速率。

7-2　有几种光复用技术?

为了提高信道容量，充分利用光纤带宽信道，方便光纤传输，

把多个低容量信道以及开销信息，复用到一个大容量传输信道。可以在电域和光域同时复用多个信道到一根光纤上。因此，复用后的多个信道共享光源的光功率和光纤的传输带宽。在电域内，信道复用有时分复用（TDM）、频分复用（FDM）、微波副载波复用（SCM）和码分复用（CDM）；与此相对应，在光域内，信道复用也有光时分复用（OTDM）、光频分复用，即波分复用（WDM）和光码分复用（OCDM），如图 7-2 所示。此外，还有空分复用，比如双纤双向传输就是空分复用。

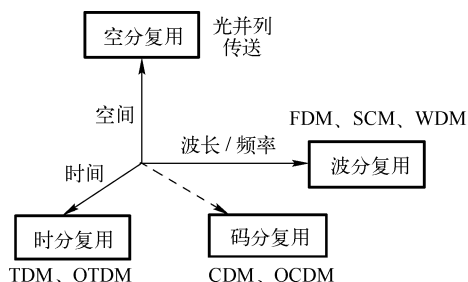


图 7-2　光纤通信系统采用的各种复用技术

7-3　什么是波分复用（WDM）技术?

我们知道，通过电的频分复用，可以扩大传输容量，那么通过光的频分复用是否也可以扩大传输容量呢? 答案是肯定的。在同一根光纤上传输多个信道，是一种利用极大光纤容量的简单途径。就像电频分复用一样，在发射端多个信道调制各自的光载波，在接收端使用光频选择器件对复用信道解复用，就可以取出所需的信道。使用这种制式的光波系统就叫做波分复用（WDM）通信系统。

图 7-3 表示中心频率靠近 1. 3 μm 和 1. 55 μm 的光纤低损耗传输窗口，插图表示 1. 55 μm 传输窗口的多信道波分复用。图 7-4 为波分复用原理图。

按照国际电信联盟（ITU-T）的规定，波分复用又分为密集波分复用（DWDM）、粗波分复用（CWDM）和宽波分复用（WWDM），

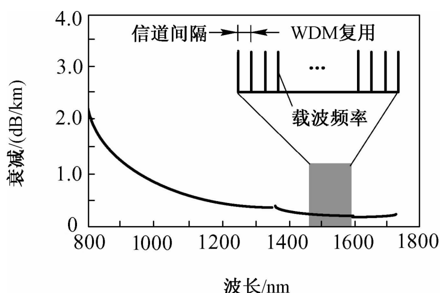


图 7-3　硅光纤低损耗传输窗口

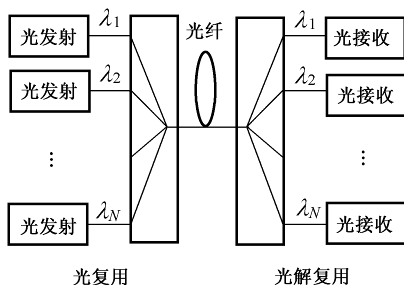


图 7-4　波分复用光纤通信系统原理图

其波长间隔 $\Delta\lambda$ 分别为 < 8 nm、 < 50 nm 和 > 50 nm。光频分复用（OFDM）和 WDM 之间原理上没有多大区别，从实际的观点看，当信道间距变得和比特速率接近时（密集的 FDM）就必须使用相干检测技术，而信道间距较大时（ > 100 GHz）可以采用直接检测技术。

波分复用器（WDM）的功能是把多个不同波长的发射机输出的光信号复合在一起，并注入一根光纤，如图 7-4 所示。解复用器的功能与波分复用器正好相反，它是把一根光纤输出的多个波长的复合光信号，用解复用器还原成单个不同波长信号，并分配给不同的接收机。由于光波具有互易性，改变传播方向，解复用器可以作为复用器，但解复用器要求有波长选择元件，而复用器则不需要这种元件。根据波长选择机理的不同，波分解复用器件可以分为无源和有源两种类型。

7-4　WDM 系统有哪几种网络单元？

在 WDM 网络中，有许多 WDM 网络单元，这些网络单元是光终端复用器（OTM）或光线路终端（OLT）、光分插复用器（OADM）、光交叉连接器（OXC）和光线路放大器（OLA），如图 7-5 所示。OLT、OADM、OXC 内部接口端都有波分复用/解复用器，核心部件是光交叉矩阵，用于波长的交叉连接，另外它们内部通常也有光放大器，用于补偿内部器件的损耗。

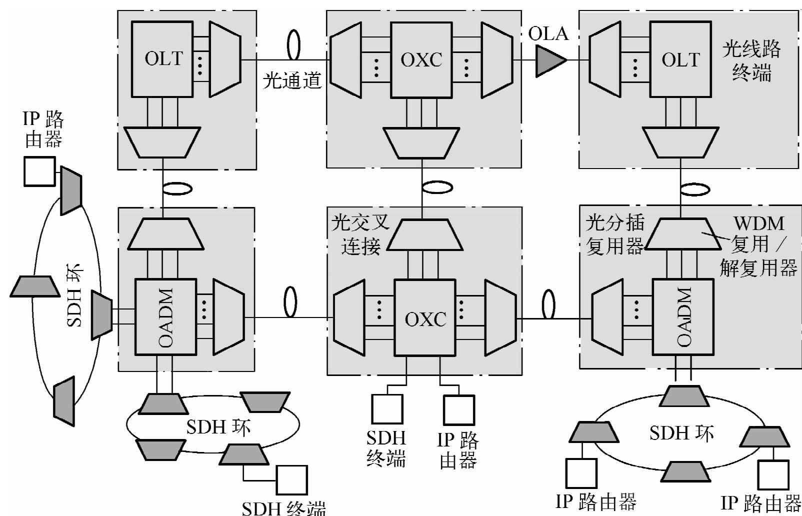


图 7-5　由 OLT、OADM 和 OXC 等网元组成的 WDM 网络

光线路放大器（OLA）可能是掺铒光纤放大器（EDFA），也可能是拉曼放大器，用于对双向传输光信号的放大，以便延长中继距离。

OTM 或 OLT 用于点对点连接；OADM 对部分波长分出来下路到本地使用，而余下的波长则继续送往其他地方使用，它们通常采用树形结构或环状结构；OXC 执行与 OADM 同样的功能，但其规模要比 OADM 大得多，通常用于网状结构或连接多个环的节点。

网络用户支持 IP 路由器、ATM 交换机、SDH 终端复用器（TM）和数字分插复用器（DXC）。

光通道可以使用相同的波长，这种波长再利用允许网络使用有限的波长来支持大量的光学通道。

7-5　WDM 系统光线路终端（OLT）如何构成？

光线路终端（OLT）有时也称光终端复用器（OTM），其功能是一样的，用于点对点系统的终端，对波长进行复用/解复用，如图 7-6 所示。由图可见，光线路终端包括转发器、WDM 复用/解复用器、光放大器（EDFA）和光监控信道。

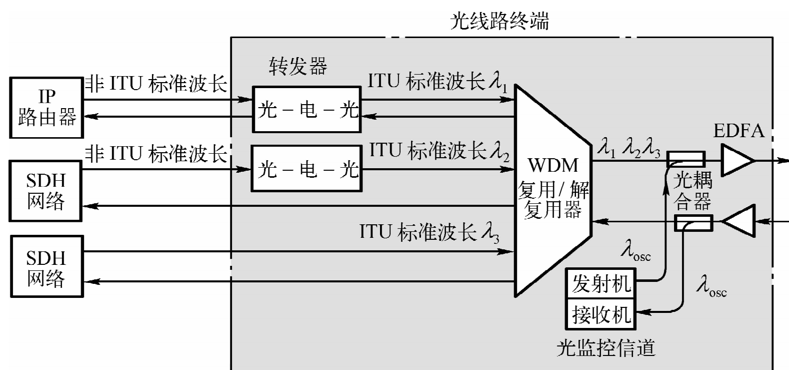


图 7-6　光线路终端（OLT）构成原理图

OLT 具有光－电－光变换功能的转发器（或称中继器），对用户使用的非 ITU-T 标准波长转换成 ITU-T 的标准波长，以便于使用标准的波分复用/解复用器。这个功能也可以移到 SDH 用户终端设备中完成，如果今后全光波长转换器件成熟，也可以用它替换光－电－光转发器。转发器通常占用 OLT 的大部分费用、功耗和体积，所以减少转发器的数量有助于实现 OLT 设备的小型化，降低其费用。

光监控信道使用一个单独波长，用于监控线路光放大器的工作情况，以及系统内各信道的传输质量（误码率），帧同步字节、公务字节、网管开销字节等都是通过光监控信道传递的。

WDM 复用/解复用可以使用阵列波导光栅（AWG）、介质薄膜滤波器等器件。

7-6　WDM 系统光分插复用器（OADM）如何构成?

在 WDM 网络中，需要光分插复用器（OADM），在保持其他信道传输不变的情况下，将某些信道取出而将另外一些信道插入。可以认为，这样的器件是一个波分复用/解复用对，如图 7-7 所示。图 7-7a为固定波长光分插复用器，图 7-7b 为可编程分插复用器，通过对光纤光栅调谐取出所需要的波长，而让其他波长信道通过，所以这样的分插复用器称为分插滤波器。使用级联的马赫－曾德尔滤波器构成的方向耦合器也可以组成多端口的分插滤波器。

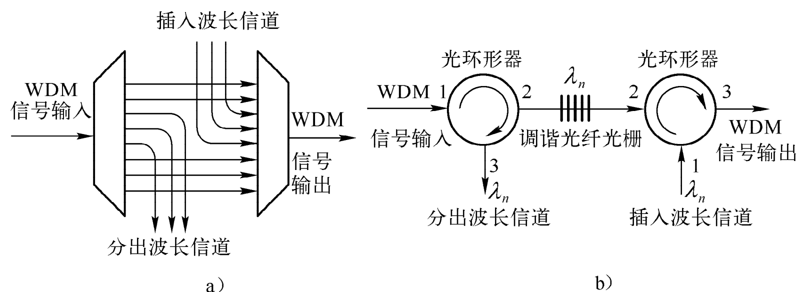


图 7-7　光分插复用器（OADM）

a）固定波长光分插复用器　b）可编程分插复用器

光分插复用器（OADM）对部分波长（或波段）分出来下路到本地使用，而余下的波长（或波段）则继续送往其他地方使用，如图 7-7 所示。OADM 通常位于两个终端之间，但也可以作为独立的网络单元使用，特别是在城域网络中。现在的 OADM 通常分出/插入波长是固定的，如果使用可调谐滤波器和激光器，则可以构成可重新配置（即重构）的 OADM（ROADM）。

光分插复用器中的主要器件是波分复用/解复用器，大多实用 WDM 器件使用阵列波导光栅（AWG）或介质薄膜滤波器（分别见问 3-11 和问 3-8）。

7-7　WDM 系统光交叉连接器（OXC）如何构成？

波长选择交换（WSS）有时也称为光交叉连接（OXC），具有传输速率高、容量大、抗干扰能力强和对传输速率、信号格式透明等优点，是最有前途的下一代交换设备的基础。图 7-8b 为具有 M 个端口的 WSS 原理图，每个端口接收 N 个波长的 WDM 信号，解复用器后分配每个波长到相应的空分交换矩阵，每个交换矩阵的输入信号的波长都相同，并有一个额外的输入和输出口，允许插入和分出信道。交换后再将它们的输出信号送到 M 个复用器，以便构成 WDM 信号。这样的 OXC 需要 M 个复用器和 M 个解复用器和 $N(M+1)\times(M+1)$ 个光开关。

OXC 是一个提供动态服务和网络修复功能的大型交换矩阵，一般用在网状结构或连接多个环的节点中。OXC 可以提供交换波长或交换波段或交换光纤信道的功能。

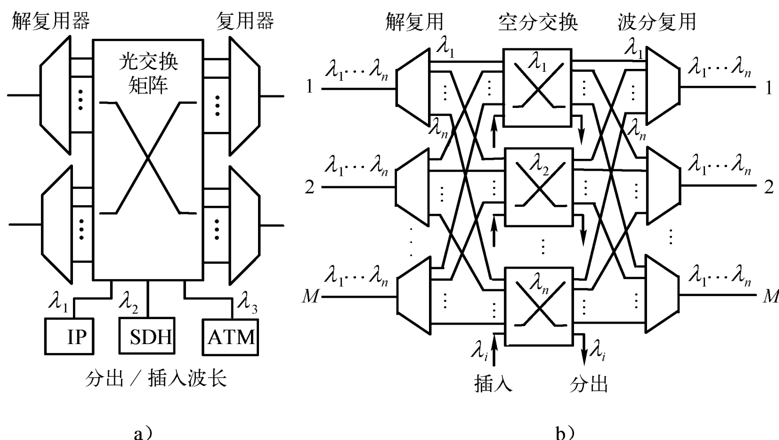


图 7-8　光交叉连接器原理图

a）光交叉连接器原理图　b）需要 M 个复用器和 M 个解复用器和 $N(M+1)\times(M+1)$ 个光开关的 OXC

7-8　WDM 系统光线路放大器（OLA）如何构成?

光线路放大器（OLA）每 80 ~ 120 km 被插入光纤线路中，对在光纤中传输的双向光信号进行放大，以便补偿传输损耗，延长中继距离。OLA 可能是掺铒光纤放大器（EDFA），也可能是拉曼放大器，如图 7-9 所示。在光线路放大器（OLA）中，可能包括色散补偿模块，用于补偿光信号在光纤传输时累积的色散值；也可能包括一个光分插复用器（OADM），用于分出/插入波长信道。由问 6-12 可知，拉曼放大使用传输光纤作增益介质，可以前向泵浦，也可以后向泵浦，通常使用后向泵浦。在 OLA 中，也需要对在光纤中传输的光信号进行监控，所以需要在 OLA 前端用 WDM 器件取出监控波长信道，而在其后端用光耦合器再插入光监控信道波长信号到传输线路中。

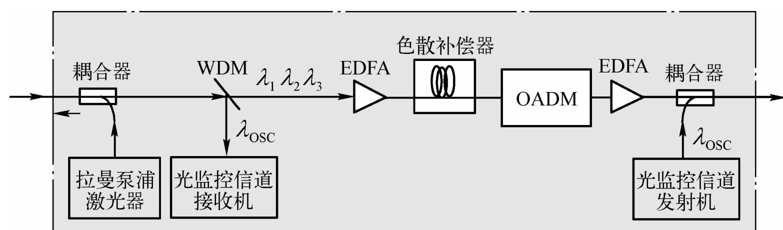


图 7-9　单向光线路放大器（OLA）的典型结构

7-9　如何让光携带声音和数字信号?

对光进行调制就可以让光携带声音和数字信号。何谓光调制？用快速上下移动快门，使光波间断通过遮光板的孔洞，就可实现光的脉冲调制，如图 7-10a 所示。

在无线电广播和通信系统中，调制是用数字或模拟信号改变电载波的幅度、频率或相位的过程。改变载波的幅度调制叫非相干调制，而改变载波的频率或相位调制叫相干调制。调幅收音机是非相干调制，而调频收音机是相干调制。与无线电通信类似。

在光通信系统中，也有非相干调制和相干调制。非相干调制有

直接调制和外调制两种，前者是信息信号直接调制光源的输出光强，后者是信息信号通过外调制器对连续输出光的幅度或相位或偏振进行调制。

激光器发出的光波是一种平面电磁波，式（1-1）描述沿 z 方向传输的电场，也可以写成

$$E_x(t)=E_0(t)\cos[2\pi f(t)t+\phi(t)] \tag{7-3}$$

如图 7-10b 所示，这里 $E_0(t)$ 是以光频 $f(t)$ 振荡的光波电场振幅包络，$\phi(t)$ 是它的相位。从原理上讲，不论改变这三个参数中的哪一个，都可以实现调制。改变 $E_0(t)$ 的调制是幅度调制，如图 7-10c 和图 7-10d 所示；改变 $f(t)$ 的调制是频率调制，如图 7-10f 所示；改变 $\phi(t)$ 的调制是相位调制，如图 7-10g 所示。另外还有一种调制，那就是改变光的偏振方向，如图 7-10e 所示。

早期，所有实用化的光纤系统都是采用非相干的强度调制——直接检测（IM/DD）方式，这类系统成熟，简单，成本低，性能优良，已经在电信网中获得广泛的应用。然而，这种 IM/DD 方式没有利用光载波的相位和频率信息，从而限制了其性能的进一步改进和提高。近年来，调制信号相位的正交相移键控（DQPSK）和既利用信号偏振又调制信号相位的偏振复用差分正交相移键控（PM-DQPSK）受到人们

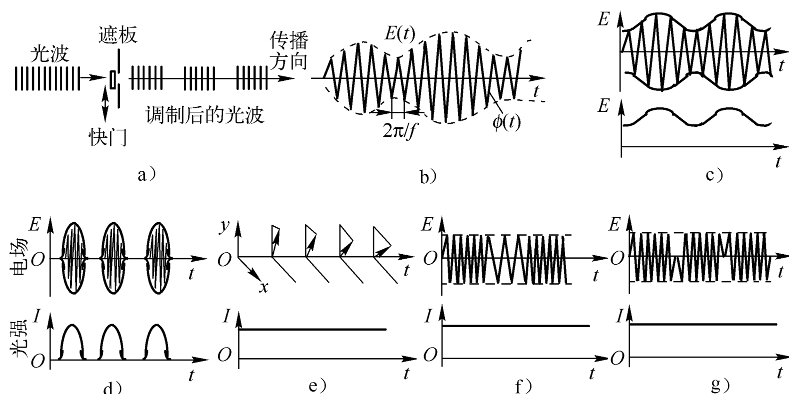


图 7-10　光的各种调制方式

a）脉冲调制　b）光波的振荡波形　c）幅度调制　d）脉冲调制
e）偏振调制　f）频率调制　g）相位调制

的高度重视，进行了深入的研究，并在 40 Gbit/s 系统中得到了应用。

IM/DD 方式是用电信号直接调制光载波的强度，在接收端，光信号被光敏二极管直接探测，从而恢复发射端的电信号。直接强度调制有模拟和数字强度调制，以及副载波调制（SCM）。副载波调制是首先用输入信号对高频电磁波（相对于光载波是副载波）进行调制，然后再用该副载波对光波进行二次调制，如图 7-11b 所示。副载波又有模拟和数字之分，有时将副载波调制简称为载波调制。

7-10　光调制器如何分类?

光调制有直接调制和外调制两种方式。前者是信号直接调制光源的输出光强，后者是信号通过外调制器对连续输出光进行调制。直接调制是激光器的注入电流直接随承载信息的信号而变化，如图 7-11a 所示，但是用直接调制来实现调幅（AM）和幅移键控（ASK）时，注入电流的变化要非常大，并会引入不希望有的线性调频（啁啾）。

在直接检测接收机中，光检测之前没有光滤波器，在低速系统中，较大的瞬时线性调频影响还可以接受，但是在高速系统、相干系统或用非相干接收的波分复用系统中，激光器可能出现的线性调频使输出线宽增大，使色散引入脉冲展宽较大，信道能量损失，并产生对邻近信道的串扰，从而成为系统设计的主要限制。

如果把激光的产生和调制过程分开，就完全可以避免这些有害

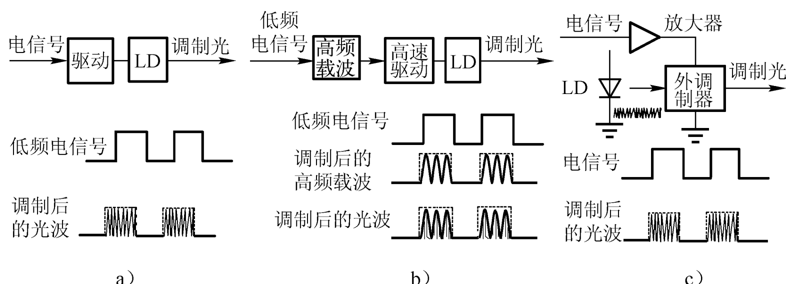


图 7-11　几种直接强度光调制（IM/DD）示意图解

a）直接调制　b）副载波调制 SCM　c）外调制

影响。外调制方式是让激光器连续工作，把外调制器放在激光器输出端之后，如图 7-11c 所示，用承载信息的信号通过调制器对激光器的连续输出进行调制。只要调制器的反射足够小，激光器的线宽就不会增加。为此，通常要插入光隔离器。

图 7-12 为光通信调制方式分类。

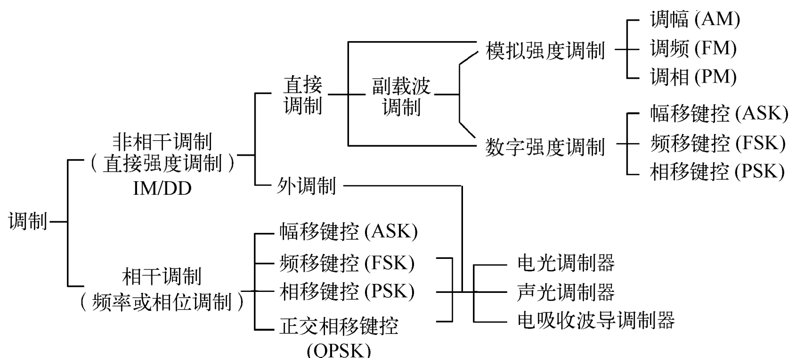


图 7-12　光通信采用的调制方式

7-11　最常用的外调制器是什么？

最常用的外调制器是在铌酸锂（$LiNbO_3$）晶体表面用钛扩散波导构成的马赫－曾德尔（M-Z）干涉型调制器，如图 7-13 所示。使用两个频率相同但相位不同的偏振光波，进行干涉的干涉仪，外加电压引入相位的变化可以转换为强度的变化。在图 7-13a 表示的由两个 Y 形波导构成的结构中，在理想的情况下，输入光功率在 C 点平均分配到两个分支传输，在输出端 D 干涉，所以该结构起到了一个干涉仪的作用，其输出强度与两个分支光通道的相位差有关。两个理想的背对背相位调制器，在外电场的作用下，能够改变两个分支中待调制传输光的相位。由于加在两个分支中的电场方向相反，如图 7-13a 的右上方的截面图所示，所以在两个分支中的折射率和相位变化也相反，例如若在 A 分支中引入 $\pi/2$ 的相位变化，那么在 B 分支则引入 $-\pi/2$ 相位的变化，因此 A、B 分支将引入相位 π 的变化。假如输入光功率在 C 点平均分配到两个分支传输，其幅度为 E，在

输出端 D 的光场为

$$E_{\text{output}} \propto E\cos(\omega t+\phi)+E\cos(\omega t-\phi)=2E\cos\phi\cos(\omega t) \quad (7\text{-}4)$$

输出功率与 E_{output}^2 成正比，所以由式（7-4）可知，当 $\phi=0$ 或 π 时，输出功率最大；当 $\phi=\pi/2$ 时，两个分支中的光场相消干涉，使输出功率最小，在理想的情况下为零，于是

$$\frac{P_{\text{out}}(\phi)}{P_{\text{out}}(0)}=\cos^2\phi \quad (7\text{-}5)$$

作为一个特例，当两臂间的相位差等于 $\pi/2$ 时，在 D 点出现了相消干涉，输入光强为零；当两臂的光程差为 0 或 π 的倍数时，干涉仪相长干涉，输出光强最大。当调制电压引起 A、B 两臂的相位差在 0 ~ π 时，输出光强将随调制电压而变化。由于外加电场控制着两个分支中干涉波的相位差，所以外加电场也控制着输出光的强度。由此可见，加到调制器上的电比特流在调制器的输出端产生了波形相同的光比特流复制。

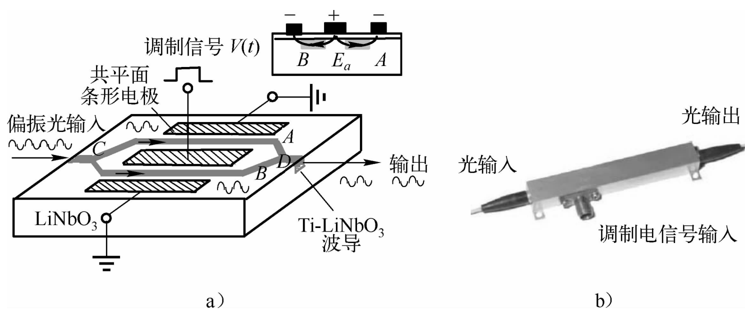


图 7-13　马赫 - 曾德尔强度调制器

a）原理图　b）外形图

7-12　如何实现频分复用(FDM)和波分复用(WDM)?

图 7-14 为电频分复用（FDM）的原理图。本质上，频分复用是把基带带宽分别为 $(\Delta f)_1$、$(\Delta f)_2$、…、$(\Delta f)_N$ 的多个信息频率通道，分别调制到不同的载波上，然后再“堆积”在一起，以便形成一个合成的电信号，最后用这一合成信号以某种调制方式去调制光载波。

经光纤信道传输后，在接收端对光信号进行解调，再进一步借助带通滤波器（BPF）与各信道的频率选择器（电相干检测），将各基带信息分离和重现出来。

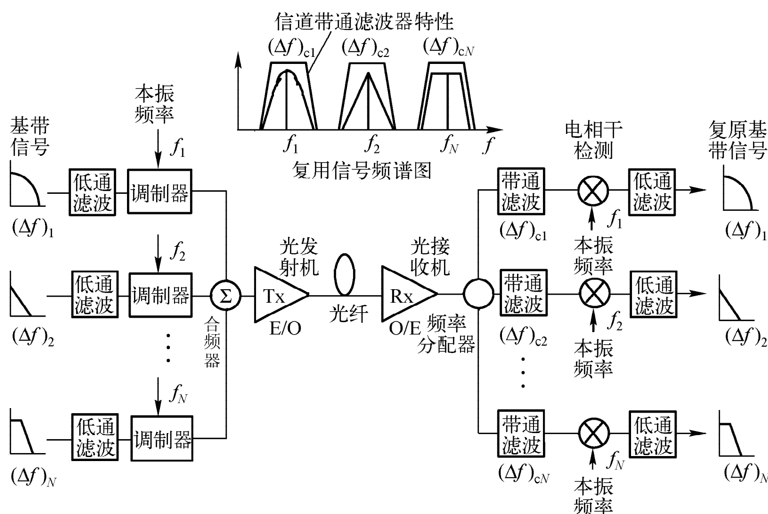


图 7-14　电频分复用光纤传输系统原理图

多路复用信号经长距离传输后，进入接收端。在这里，复用信号经光－电（O/E）转换放大后，经过频率分配器（作用与 FDM 相反）分配到各自的解调信道。解调信道采用电相干检测，类似于外差收音机的选频器，把基带信号解调恢复出来。应注意的是，各解调器的本地载波要与发送载波同步。与时分复用（TDM）比较见问 7-13，不同点仅仅在于：在 TDM 中，发送同步（时钟）脉冲，已确保发送两端的路序在时间上一一对应；而在 FDM 中，则要求在发送端和接收端各路载波在频率及相位上相同。

假如调制器的作用仅仅起上变频的作用，则传输的载波信道带宽$(\Delta f)_{cN}$大致与基带信道带宽$(\Delta f)_N$相同。在一些系统中，合成器可能起着调幅和调频或调相器的双重作用。此时，$(\Delta f)_{cN} > (\Delta f)_N$，这与调制参数有关。

FDM 技术的典型应用就是光纤同轴电缆混合网络（HFC），它把多个频道的模拟视频信号用 FDM 技术复用在一起，以广播的形式传送

到千家万户（见问 8-26）。

波分复用是把基带带宽分别为$(\Delta f)_1$、$(\Delta f)_2$、…、$(\Delta f)_N$的多个信息通道，分别调制到不同的光载波上（注意与 SCM 的电载波不同），如图 7-15 所示，然后再通过波分复用器将这些光信号（注意与 SCM 的电载波不同）“堆积”在一起，以便形成一个合成的光信号，经光纤信道传输。光波分复用（WDM）解调，是用光纤法布里 - 珀罗滤波器或者采用相干检测技术，首先把各个光载波分离和重现出来，然后用带通滤波器和各信道的频率选择器，把基带信号分离和重现出来。

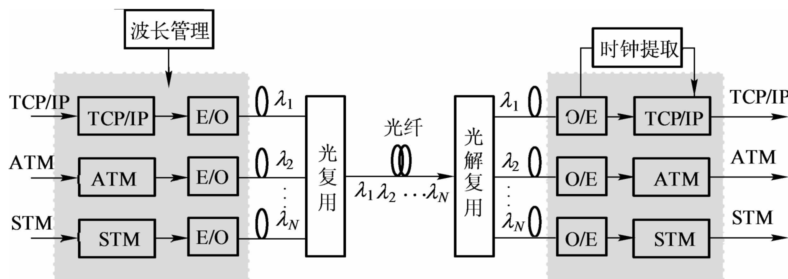


图 7-15　一种可能的 DWDM 系统集线器

7-13　时分复用（TDM）的基本原理是什么？

同步数字制式（SDH）光纤传输系统可以说是一种最典型的电时分复用（TDM）应用。时分复用是采用交错排列多路低速模拟或数字信道到一个高速信道上传输的技术。

时分复用系统的输入可以是模拟信号，也可以是数字信号。目前 TDM 通信方式的输入信号多为数字比特流，所以，我们只讨论数字信号时分复用。

模拟信号转变为数字信号的原理是，利用脉冲编码调制（PCM）方法，将语音模拟信号经取样、量化和编码三个过程转变为数字信号（见问 7-1）。为了实现 TDM 传输，要把传输时间按帧划分，每帧 125 μs，把帧又分成若干个时隙，在每个时隙内传输一路信号的一个字节（8 bit），当每路信号都传输完一个字节后就构成一帧，然后再

从头开始传输每一路的另一个字节，以便构成另一帧。也就是说，它将若干个原始的脉冲调制信号在时间上进行交错排列，从而形成一个复合脉冲串，如图 7-16b 所示，该脉冲串经光纤信道传输后到达接收端。在接收端，采用一个与发送端同步的类似于旋转式开关的器件，完成 TDM 多路脉冲流的分离。

图 7-16a 为 24 路数字信道（T1）时分复用系统构成的原理图。首先，同步或异步数字比特流送入输入缓存器，在这里被接收并存储。然后一个类似于旋转式开关的器件以 8 000 转/s（即 $f_s = 8\,\text{kHz/s}$）轮流地读取 N 个输入数字信道缓存器中的 1 字节的数据，其目的是实现每路数据流与复用器取样速率的同步和定时。同时，帧缓存器按顺序记录并存储每路输入缓存器数据字节通过的时间，从而构成

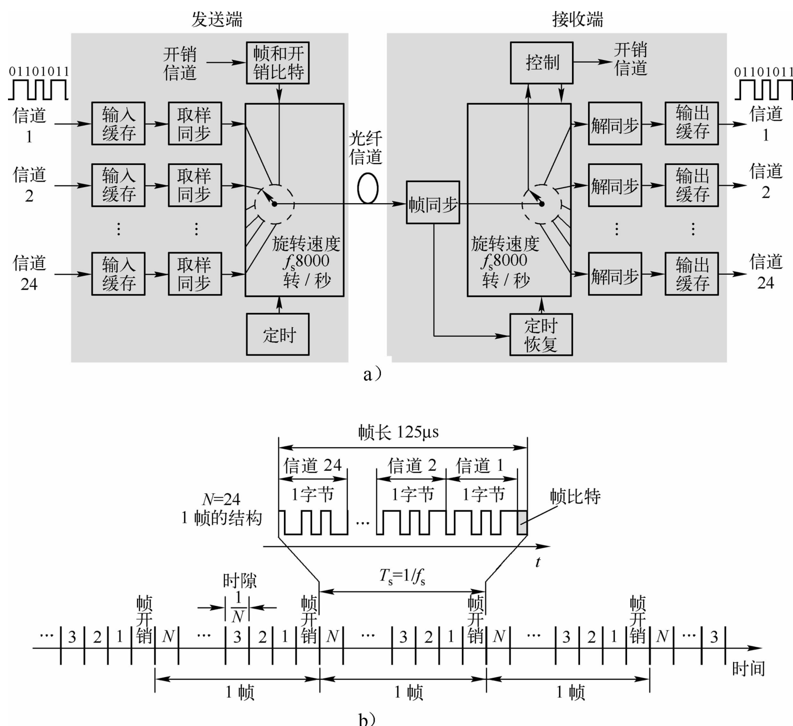


图 7-16　数字输入时分复用原理图

a）24 路数字信道（T1）时分复用系统构成原理图　b）N 个信道复用后的帧结构

数据帧。N 个信道复用后的帧结构如图 7-16b 所示。

话音信号的频带为 300 ~ 4 000 Hz，取上限频率为 4 000 Hz，按取样定理，取样频率为 $f_s = 2 \times 4\,\text{kHz} = 8\,\text{kHz/s}$（即每秒取样 8 000 次）。取样时间间隔 $T = 1/f_s = 1/8\,\text{k} = 125\,\mu\text{s}$，即帧长为 125 μs。在 125 μs 时间间隔内要传输 8 个二进制代码（比特），每个代码所占时间为 $T_b = 125/8\,(\mu\text{s})$，所以每路数字电话的传输速率为 $B = 1/T_b = 64\,\text{kb/s}$（或者 8 bit/每次取样 ×8 000 次/每秒取样）。按照国际电联的建议，把 1 帧分为 32 个时隙，其中 30 个时隙用于传输 30 路 PCM 电话，另外 2 路时隙分别用于帧同步和信令/复帧同步，则传输速率为 64 kbit/s × 32 = 2 048 kbit/s（也就是 8 bit/每个取样值 ×32 个取样值/每次 × 8 000次/每秒）。这一速率就是我国 PCM 通信制式的基础速率。

当每个信道的数据（通常是一个 8 bit 的字节）依次插入帧时隙时，由于信道速率较低，而复用器取样速率较高，有可能出现没有数据字节来填充帧时隙的情况，此时可用一些空隙字节来填充。在接收端把它们提取出来丢弃。在帧一级，也要插入一些定时和开销比特，其目的是为使解复用器与复用器同步。为了检测误码并满足监控系统的需要，也插入另外一些比特。这些填充比特、同步比特、误码检测和开销比特在图 7-16 中用帧开销时隙表示。

为了在光纤中传输，要对已形成的串联比特流编码。在接收端，接收转换开关要与发送转换开关帧同步，恢复定时信号，解码并转换成双极非归零脉冲波形。该信号被送入接收缓冲器，同时也检出控制和误码信号。然后把存储的帧信号依次从接收缓冲器取出，每路字节信号分配到各自的输出缓冲器和解同步器。输出缓冲器存储信道字节并以适当的信道速率依次提供与输入比特流速率相同的输出信号，从而完成时分解复用的功能。

7-14　电视台送到各家各户的电视节目是采用何种复用技术？3G 和 4G 手机信号和固定电话信号各采用何种复用技术？

目前广电网络采用光纤/电缆混合网（HFC），将电视节目送到

千家万户，它是一种典型的频分复用光纤通信系统，主要任务是把多频道模拟视频信号以 FDM 技术复用在一起（见问 7-12），通过光纤和电缆以广播的形式传送到千家万户。

3G 手机信号采用码分复用（CDM）技术，4G 手机信号采用正交频分复用（OFDM）技术（见问 8-6）。

固定电话信号使用电时分复用（TDM）技术（见问 7-13）。同步数字制式（SDH）时分复用光纤传输系统采用交错排列多路低速数字信道到一个高速信道上。

7-15　SDH 如何将低速信号复用映射成高速信号?

为了得到标准的 STM-*N* 传送模块，必须采取有效的方法将各种支路信号装入 SDH 帧结构的净荷域内，为此，需要经过映射、定位校准和复用三个步骤。图 7-17 为适用于我国的 SDH 基本复用映射结构。

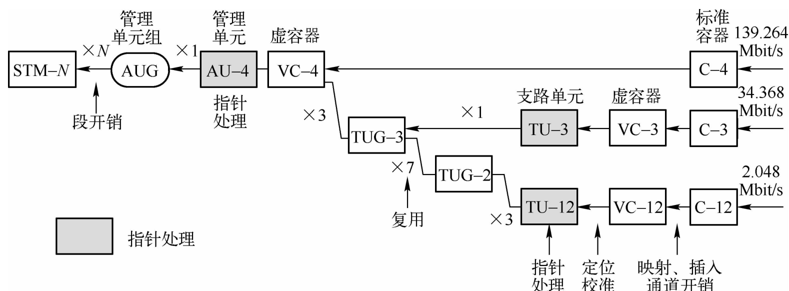


图 7-17　适用于我国的 SDH 基本复用映射结构

首先，各种速率等级的数字信号先进入相应的不同接口容器 C，针对现有系统常用的准同步数字体系（PDH）信号速率，G. 709 规定了五种标准容器，但适用于我国的只有 C-4、C-3 和 C-12，这些容器是一种信息结构，主要完成适配功能。

由标准容器出来的数字流加上通道开销比特后，构成 SDH 中的虚容器（VC），在 VC 包封内，允许装载不同速率的准同步支路信号，而整个包封是与网络同步的，因此，常将 VC 包封作为一个独立

的实体对待，可以在通道中任一点取出或插入，给 SDH 网中传输、同步复用和交叉连接等过程带来了便利。

由 VC 出来的数字流进入管理单元（AU）或支路单元（TU），其中 AU 是一种为高阶通道层和复用段层提供适配功能的信息结构，它由高阶 VC 和管理单元指针（AU PTR）组成。一个或多个在 STM 帧内占有固定位置的 AU，组成管理单元组（AUG）；同理，TU 是一种为低阶通道层和高阶通道层提供适配功能的信息结构，它由低阶 VC 和支路单元指针（TU PTR）组成。一个或多个在高阶 VC 净荷中占有固定位置的 TU 组成管理单元组（TUG）。最后，在 *N* 个 AUG 的基础上再加上段开销比特，就构成了最终的 STM-*N* 帧结构。

7-16　不同等级的 STM-*N* 速率是多少？如何进行等级复用？

图 7-18 表示 SDH 的等级复用原理，首先几个低比特率信号复用成 STM-0 信号，接着 3 个 STM-0 信号复用成 STM-1 信号，几个低比特率信号也可以直接复用成 STM-1 信号。然后 4 个 STM-1 信号复用成 STM-4 信号，依此复用下去，最后 4 个 STM-64 信号复用成 STM-256（39 813. 12 Mbit/s）信号。

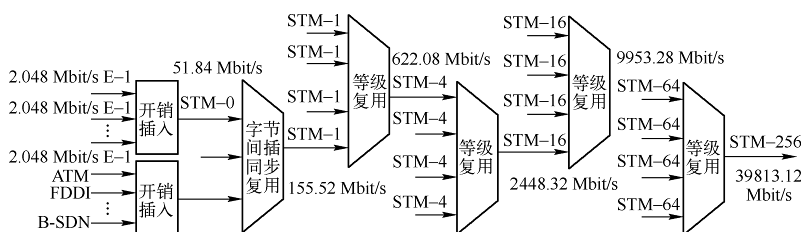


图 7-18　SDH 的等级复用

7-17　SDH 有哪几种传输终端设备？SDH 系统通常用什么结构？

SDH 设备产品可划分为三类，即接入、交换和传送设备。交换

设备有早期使用的电路交换和分组交换设备，以及目前使用的异步传送模式（ATM）设备。传送设备则有终端复用器（TM）、分插复用器（ADM）、数字交叉连接设备（DXC）以及光中继器。中继器可以是光－电－光再生中继器，也可以是全光中继器（EDFA）。

图 7-19 表示 STM-1 的终端设备，其中图 7-19a 为终端复用器，图 7-19b 为分插复用器，图 7-19c 表示在继续向下一站传送信息的同时可实现上/下话路的分插复用器。

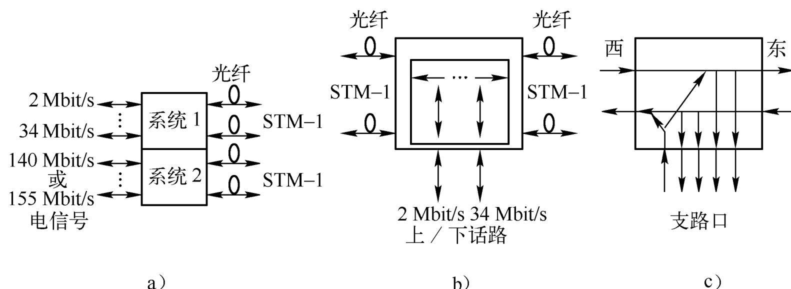


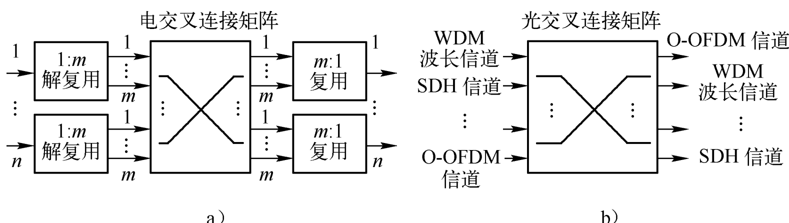
图 7-19　适合我国制式的 STM-1 终端设备

a）终端复用器（TM）　b）分插复用器（ADM）　c）ADM 上/下话路功能示意图

终端复用器（TM）的主要任务是将低速支路信号或者低速 SDH 信号复用进高速的 SDH 设备。分插复用器（ADM）具有灵活地分插任意支路信号的能力。

数字交叉连接设备（DXC）是一种集复用、交叉连接（自动化配线）、保护/恢复、监控和网管等功能为一体的传输设备。图 7-20a 表示 DXC 的功能简图，传输系统送来的信号在输入端解复用成 m 个并行的信号，然后由交叉连接矩阵按照预先存放的交叉连接表或动态计算出的交叉连接表，按时隙交换原理对这些信号重新安排通道，最后再将这些重新安排后的信号复用成高速信号输出。DXC（有人也称 DCS）交换的最小单位称为粒度，粒度可以是 E1 速率（2 Mbit/s）、STM-1 速率（155 Mbit/s）、STM-16（2.5 Gbit/s），甚至可能是 STM-64 速率（10 Gbit/s）。DXC 输入输出接口可以是电学接口，也可是光学接口。光学接口可以是光纤信道、SDH 设备光接口、千兆位速率以太网光接口，也可以是 WDM 系统的波长信道、光正交频分

复用（O-OFDM）系统的波带等，如图 7-20b 所示。



a）　　b）

图 7-20　DXC 功能简图

a）电 DXC 原理图　b）光 DXC 原理图

通常，SDH 系统为点对点系统和环状系统，分别如图 7-21 和图 7-22 所示。在点对点系统中，它由包含复用功能和光接口的线路终端复用器（TM）、光缆、中继器（如果配置的话）组成。中继器可以是常规的光－电－光再生器，也可以是使用 EDFA 的全光中继器。

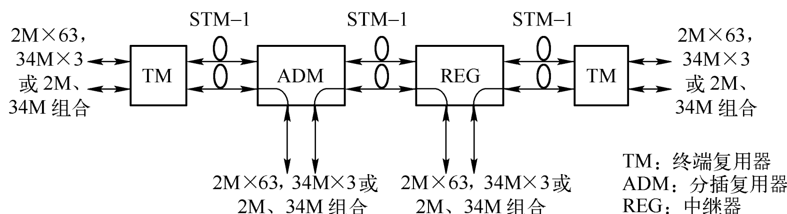


图 7-21　STM-1 分插复用器构成的 SDH 点对点系统

在环状系统中，节点设备可以是分插复用器（ADM），也可以是数字交叉连接设备（DXC）。

环状结构在链路或节点失效的情况下，能为系统提供一条替换的路由，同时拓扑结构也很简单，所以在 SDH 系统的骨干网和接入网中常用。目前使用的环状结构有两类：单向通道交换环和双向线路交换环。前者通常用于网络的接入部分，将多个节点连接到位于中心交换局的集线器（Hub）节点；后者使用两根光纤或者 4 根光纤，互联多个中心交换局。

图 7-22 给出用户网通过汇接网接入骨干网的例子。

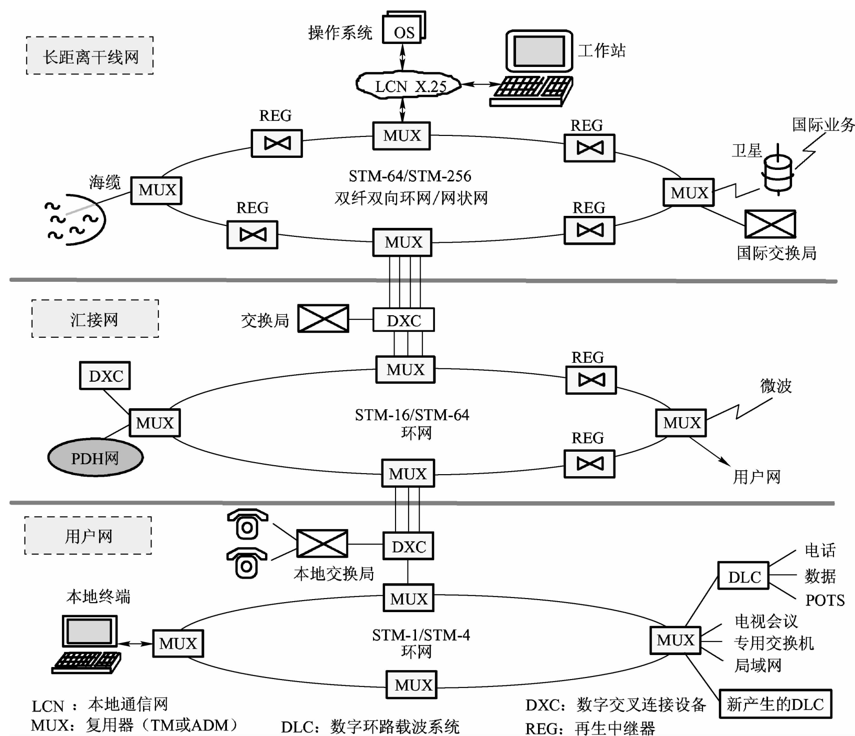


图 7-22　用户网通过汇接网接入骨干网

7-18　ATM 与 STM（SDH）有什么不同?

SDH 网是一个运行高效、维护能力强大的传输系统，它将时间分割成周期为 125 μs 的帧，使用传统的同步时分技术，要求所有的数据按照一个标准的传输速率（如 155 Mbit/s 等）进行传送，所以称 SDH 系统为同步传输模式（STM），它的分级也用 STM-*N* 表示。

传统的 SDH 设备不适合宽带综合业务接入网（B-ISDN）使用，因为在多媒体的双向应用中，上/下行的传输速率是不对称的，比如在网上看电影/电视，对下行速率和带宽的需求远大于对上行速率和带宽的需求。而 SDH 系统只传输恒定的比特率业务，上/下行传输速率和带宽总是相同，它并不能因为用户不需要而减小，实际上，在用户没有足够的信元填充一帧时，它就用空闲信元填充，所以对上行带宽的使用是一种浪费，对下行带宽又不能动态分配。

另外，人们在 PC 上对下载数据业务的延时并不在乎，但在打电话时却对话音的延时特别敏感，而 SDH 对此却无能为力。

为此，人们就提出一种与同步传输模式（STM）技术相对应的异步传输模式（ATM）技术。ATM 可支持可变速率业务，支持延时要求较小的业务，具有支持多业务多比特率的能力，因此 ATM 接入系统能够完成不同速率的多种业务接入，它既能够提供窄带业务，又能提供宽带业务，即能提供全业务接入。ATM 技术简化了分组通信协议，并由硬件对简化的协议进行处理，交换节点不再对信息进行差错控制，从而减小了延时，极大地提高了网络的通信处理能力。

ATM 技术已广泛应用于 ATM 交换和非对称数字用户线（ADSL）和 ATM 无源光网络（APON）接入网中。目前，ATM 已通过 ADSL 进入许多家庭。

ATM 技术是实现 B-ISDN 的核心技术，它以分组交换为基础，并融合了同步传送模式（STM）的优点发展而成。ATM 本质上是一种高速分组传送模式，它将话音、数据及图像等所有的数字信息分解成长度一定的数据块，并在各数据块前加上信头（即信息发往的地址、丢弃优先级等控制信息）构成信元。图 7-23b 给出把发送信息分解成信元并进行多路复用的过程。只要获得空闲信元，即可以插

入信息发送出去。因插入的信息位置不固定，故称这种传送方式为异步传送模式（ATM）。因为需要排队等待空闲信元到来时才能发送信息，所以 ATM 是以信元为单位的存储交换方式。

由图 7-23a 可见，STM 帧长为 125 μs，它靠帧内的时隙位置来识别通路。ATM 则靠信头来识别通路，故称这种复用为信头复用或统计复用。ATM 采用长度固定的信元，信元像 STM 的时隙一样定时出现。因此，可以采用硬件高速地对信头进行识别和交换处理。由此可见，ATM 技术融合了电路传送模式与分组传送模式的特点。

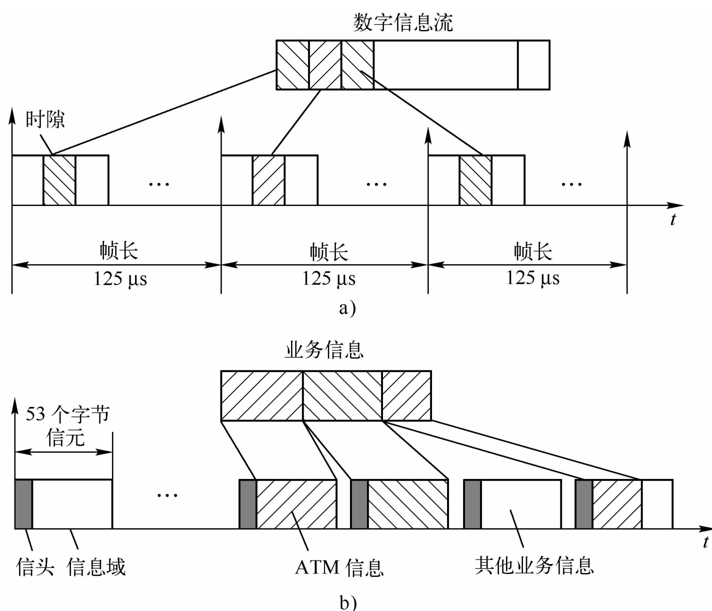


图 7-23　STM 时隙复用与 ATM 标志复用的比较

a）同步传送模式（STM）——面向时隙复用

b）异步传送模式（ATM）——面向分组复用

ATM 系统中的复用信息流被分组成长度固定的 53 个字节信元，它含有一个用户信息域和一个 5 字节的信头，信头包含了一个识别信道的标志。如果用一种规则周期性地将信元进行分配，由于信元具有固定的长度，可获得一个固定的带宽通路，所以 ATM 适用于恒定比特率业务和可变比特率（即突发的）业务的传输和交换。因为

ATM 的每个终端和交换节点必须根据信头的地址转送和交换信息，所以它是一种面向连接的技术；但是，ATM 技术也可为非连接业务提供一般的灵活传送能力。

ATM 采用面向标志的交换和复用原理，它用排队、缓冲存储甚至丢弃信元的方法来消除短期争用；而 STM 采用面向位置（即基于时隙位置）的交换和复用原理，它只用缓冲存储来消除争用。STM 用指定的时隙来识别连接，通道结构依赖于物理复用的等级，如 STM－1、STM－4、…、STM－256；而 ATM 用标志来识别信道，而与复用等级无关。因此，与 STM 的等级通道容量结构相比，ATM 通道容量是不分等级的。

7-19　何谓 IP？提供什么服务？IP 进入光传送网有几种可能的方式？

互联网协议（IP）是互联网的基本联网协议，也是当今世界上用得最广泛的联络技术，在广域网中已获得广泛的使用。以太网（Ethernet）的帧格式与互联网协议（IP）一致，特别适合于传输 IP 数据。以太网和互联网均采用相同的传输控制协议（TCP）和简单网管协议（SNMP）；既可以用于低速同轴线路传输，也可以用于高速光纤线路传输。

采用互联协议的广域网是光互联网，实际上它是一种以光纤为物理媒质的 IP 数据网，其底层物理传输网为光传输网。在传统数据网络中，主要设备是 ATM 交换机、路由器等；而在光传输网中，主要设备是 DWDM 设备，如光分插复用器（OADM）和光交叉连接设备（OXC）、光放大器等。

传统上，IP 网络提供“尽力而为”服务，即 IP 网尽最大能力将一个数据包从它的发送地传输到目的地。然而，不同的包可能选择不同的路由以不同的延时在网络中传输，假如网络存在拥塞，一些包就不得不被丢弃，造成数据错误。为此，提出了一种等级服务措施，将待发送的数据包分组成不同的等级，以不同的速度处理。路由器把“加速级”数据包排在队列的最前面，“确保级”数据包排在其后，而没有要求的数据包则排在最后，这放在最后的数据包能否被发送只能听其自然了。比如，将数据包按优先级别排队，$y=3$

的数据包丢弃的可能性要比 $y=1$ 更大。与多协议标记交换相比，IP 协议的这种“尽力而为”服务不能提供端对端的质量保证（QoS）。

图 7-24 表示 IP 进入光传输网的途径，图 7-24a 表示现在 IP 通过 SDH、ATM 或 WDM 进入光通道传输网的示意图；图 7-24b 表示未来 IP 进入光波段传输网的途径，IP 可能依次通过 SDH（或 ATM、WDM）进入光通道，然后再接入光波段传输网，或者再通过光快速电路交换接入光波段。或许会有一种新协议取代 IP，通过光快速电路交换进入光波段传输网。

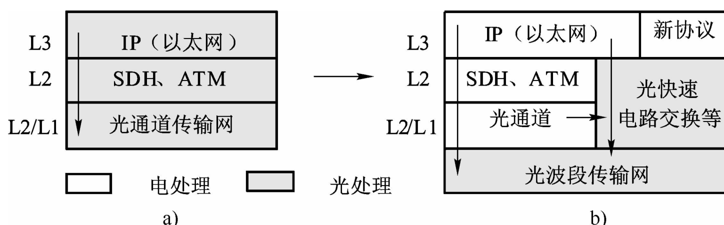


图 7-24　设想的光层演进

a）现在的网络　b）未来的网络

图 7-25 给出了光互联网的体系结构，图中 WDM 环网为核心网，终端设备是 OADM 和 OXC；SDH 环网为次核心网，终端设备是 ADM 和 DXC。IP 路由器、ATM 交换机可以直接或通过光纤和 SDH 环或光传送网（OTN）环相连。

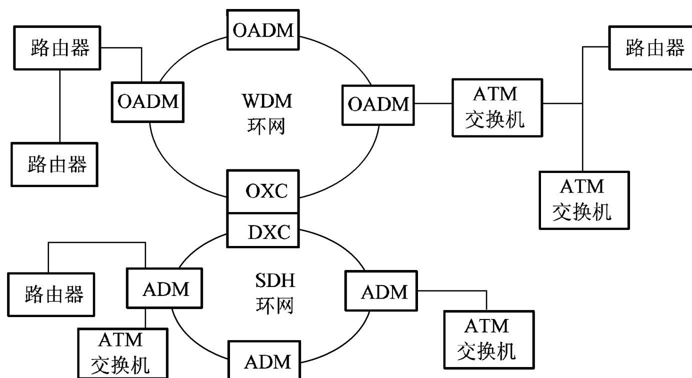


图 7-25　光互联网的体系结构

7-20　STM、ATM 和 IP 数据分组有何不同?

STM（SDH）将时间分割成周期为 125 μs 的帧，使用传统的同步时分技术，如图 7-26a 所示。

ATM 信元都是定长的，在没有信息传送时，在线路上传送的是空闲信元，因此，如果观察一条 B-ISDN 中的通信线路，我们会发现，时间仍是被划分成一个个等长的小时隙，每个小时隙都正好是一个 ATM 信元，如图 7-26c 所示。这有些类似于 SDH 的同步时分复用情况，而不同于 IP 分组交换网中的情况，IP 的帧长可变，最长为 1 526 字节，如图 7-26b 所示。

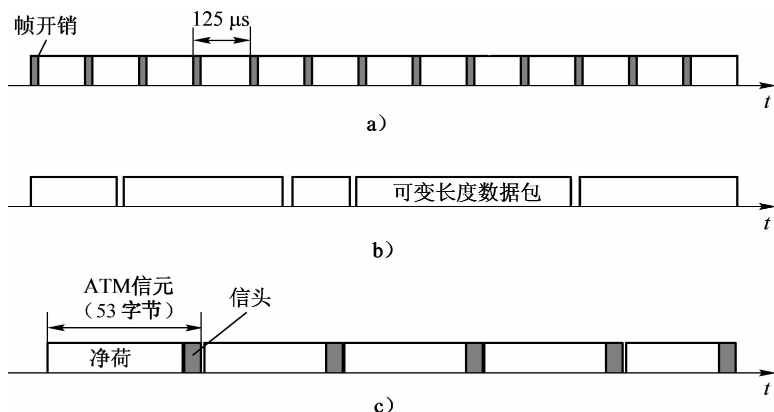


图 7-26　ATM、STM 和 IP 数据分组比较

a）同步时分复用（STM，如 SDH）　b）数据分组（如以太网帧）　c）ATM 数据传送

在 ATM 系统中，用户信息被传送前，首先把它分装成固定长度的信元。话音、活动图像等恒定速率的实时性信号，在装成一个个 ATM 信元后，应该是每隔一个固定的时间间隔出现一次。例如一路 64 kbit/s 的数字话音信号装入传输速率为 155. 52 Mbit/s 的 ATM 信元，每隔 6 ms 出现一次。在话音信元 6 ms 的间距内，可以插入数据和图像信元，插入的信元数量分别根据数据信号和图像信号占据的带宽（即与传输速率相对应）来确定。我们可以把这些话音信道、数据信

道和图像信道都叫做虚信道（VC），我们把用来同时传送这些虚信道的路径称为虚通道（VP）。因为传送这些信息的信道和通道并不是永久不变的实际路径，所以我们称它们为虚信道和虚通道。

7-21　以太网如何接入互联网?

图 7-27 表示以太网可以通过路由器接入互联网（IP 广域网），这里路由器相当于一个网关，它能提供任何网桥的所有功能。在互联网中，每个设备都有它自己的 IP 地址，并且在一个给定的网络范围内，所有的设备必须有相同的 IP 网络地址和唯一的主机编号，例如以太网 A 的 IP 地址是 192. 168. 9，属于该网的设备都是这个地址，为了区分接入该网的设备，再给每个设备编一个号，如打印机的 IP 地址是 192. 168. 9. 13。

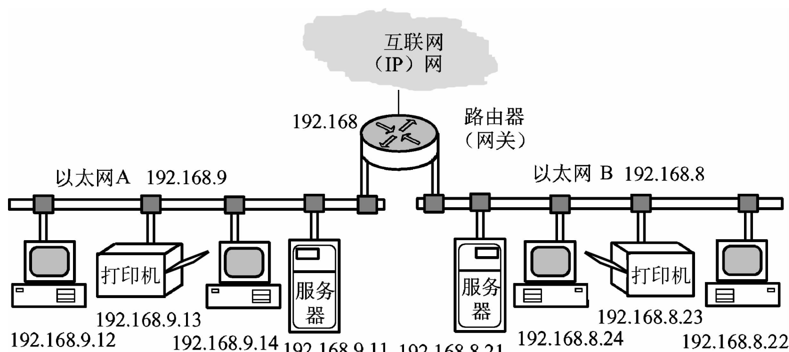


图 7-27　以太网通过路由器接入互联网

7-22　什么是多协议标记交换（MPLS）?

1997 年，Internet 网络工程组提出了多协议标签交换（MPLS）技术，该技术使用简单的标记交换原理取代 IP 一跳一跳的转发过程，节省了每一跳都需要高层处理的时间，从而实现了快速、高效的转发。MPLS 把路由和转发合并在一起，正如其名称所暗示的，MPLS 提供了一个标准化的多层交换技术，它综合了开放系统互联

（OSI）参考模型中的链路层（L2 层）的标记交换功能和网络层（L3 层）的路由功能。它能够兼容 L2 层上的多种技术，也能够支持 L3 层的多种协议，如 IPv4、IPv6、IPX 等。它吸收了 ATM 高速交换的优点，并引入了面向连接的控制技术，在网络边缘首先完成 L3 层的路由功能，而在 MPLS 核心网中则实现 L2 层的标记交换功能。

MPLS 在网络节点之间提供一条标记交换通道（LSP），完成 MPLS 功能的路由器称为标记交换路由器（LSR）。

MPLS 可实现的功能和具有的优点如下：

1）MPLS 的传送转发过程比经典的 IP 路由交换过程简单得多，而且这些路由交换功能都能用 ATM 硬件完成。MPLS 采用了硬件实现高效简单的传送转发方式，摒弃了 IP 复杂的路由交换信令，无缝地将 IP 技术的优势与 ATM 的高效硬件融合到转发机制中，加之 MPLS 采用定长标签，所以提高了网络的传输速率，转发路由器的流量可达 Tbit/s。

2）在 MPLS 网络中，数据传输和路由（LSR）选择是分开的。假如只要求尽量减小数据包的延时，MPLS 网络就建立一条节点到节点的专用标记通道（LSP）来传送这些数据包；如果要确保传输的质量（QoS），则要尽量分配数据传输所需的带宽。

3）MPLS 使各种网络传输技术在同一个 MPLS 平台上实现统一，可以同时支持 X. 25、帧中继、ATM、PPP、SDH、WDM 等多种网络。

4）MPLS 在网络中引入了通道的概念，这在 IP 网络中是没有的，IP 网络只能提供“尽力而为”服务。MPLS 根据网络拥塞状况计算最优路径，也可以根据协议计算出强制路由，甚至允许网络管理者指定确切的信息传输物理通道，所以 MPLS 具有流量工程的功能。

5）MPLS 对不同的业务分类排队，使延时敏感的业务获得优先排队的权利，从而保证这些业务的传输质量。

6）MPLS 具有失效路由的快速修复功能，MPLS 在网络节点之间可安排两条标记交换通道（LSP），当一条失效时，可以马上切换到备用 LSP。

7）MPLS 传输的信元有 1 500 字节，比 ATM 53 字节的信元更大，更便于数据网使用。不过，很多 MPLS 路由器内部使用 ATM 交换，来完成高速数据包的转发。

1999 年，ITU-T 一致同意将 MPLS 的标签分发协议（LDP）作为以 ATM 为基础的公网数据传输标准信令。近来还出现了增强型的 MPLS，记为 MPLS-TP。MPLS/MPLS-TP 提供基于 IP 路由和 IP 信令协议的交换能力。MPLS 与 IP 通过 ATM 传输（IP over ATM）的主要区别是，MPLS 集成了 OSI 参考模型网络的第 2 层交换和第 3 层路由的功能；而 IP over ATM 则主要完成第 2 层的功能。

7-23　什么是通用多协议标记交换（GMPLS）？

通用多协议标记交换（GMPLS）继承了几乎所有 MPLS 网络的特性和协议，并对 MPLS 的标签和标签交换通道（LSP）机制进行了扩展，从而产生了通用的标签及通用的 LSP（GLSP）。MPLS 本质上是只为分组交换网络设计的，所以它只支持分组交换；而 GMPLS 除了支持分组交换外，还支持时隙交换、波长交换，甚至还支持空分交换，如图 7-28 所示，即既支持 IP/ATM，也支持 SDH、WDM 和光纤交换。所谓光纤交换就是在光交叉连接设备（OXC）上，对一条光纤或捆绑在一起的几条光纤进行交换。

GMPLS 是 MPLS 向光网络的扩展，采用 GMPLS 光网络可以不再需要 ATM 和 SDH 层，而只需 IP 和 WDM 层就可以完成以前包括 ATM 和 SDH（共 4 层）网络完成的功能，如图 7-29 所示。同时，GMPLS 为光网络提供强有力的控制平面，通过 GMPLS，光网络控制平面能够实现资源发现并动态配置管理、路由控制和流量工程、连接管理和恢复等功能。

在 GMPLS 中，标记交换通道（LSP）承载的净荷类型包括以太网 IP 数据包、ATM 信元、SDH 帧等。

一个接口可以复用多条相同的标记交换通道（LSP），比如在图 7-28 中，时隙标记交换通道（LSP_T）就可以复用多条分组标记交换通道（LSP_P），图中只画出了两条。这样，多条低阶 LSP 就可以构成一条高阶 LSP，比如两条相对低阶的时隙交换 SDH 网络中的 LSP_T 就可以构成一条相对高阶的波长交换 LSP_λ；依次类推，两条相对低阶的波长交换 WDM 网络中的 LSP_λ 就可以构成一条最高阶的光纤交

换 LSP_F。

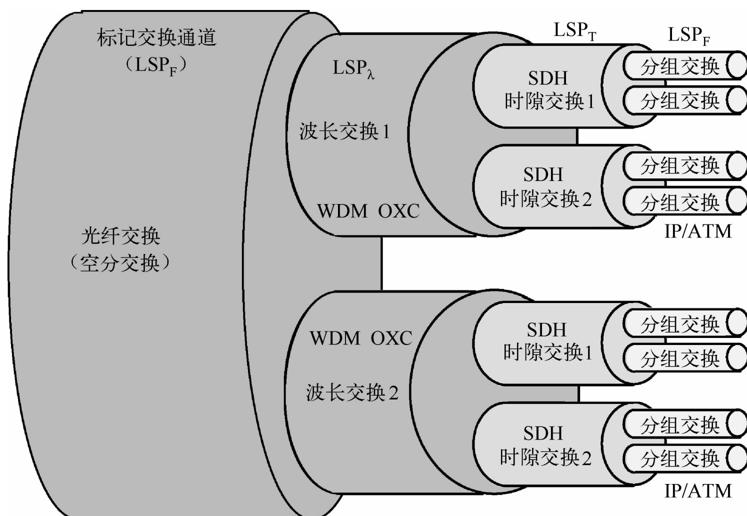


图 7-28　GMPLS 支持多种交换接口，
多条低阶标记交换通道（LSP）构成一条高阶 LSP

LSP_P：分组交换通道；LSP_T：时隙交换通道；LSP_λ：波长交换通道；LSP_F：光纤交换通道

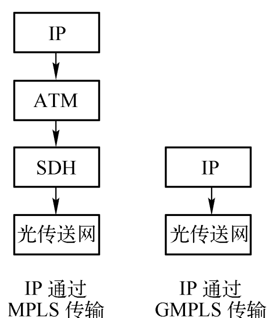


图 7-29　GMPLS 和 MPLS 的区别

在 MPLS 中，LSP 是单向的；而在 GMPLS 中，LSP 是双向的。GMPLS 协议的上游节点可以限制下游节点选择标签的范围，无论是单跳光网络，还是多跳光网络，这种做法在没有波长转换的光网络

中是十分有益的。

GMPLS 将网络划分成分组交换层、时分交换层、波长交换层和光纤交换层 4 个层次。每个层都是独立的，各层间的路由交换可以由边缘路由器实现。

7-24　什么是自动交换光网络（ASON）？

自动交换光网络（ASON）在 ITU-T 文献中定义为，通过能提供自动发现和动态连接建立功能的分布式（或部分分布式）控制平面，在光传输网（OTN）或 SDH 网络之上，实现动态控制的一种网络。

早期人们提出全光网络的概念，即用一些中间不含有光 – 电转换器的光纤，连接不同节点的透明网络。在这种网络中只有在接收机和发射机里进行了光 – 电或电 – 光转换。一个节点只包含本节点的电子信息，而与其他节点的信息无关。它能充分利用光纤的带宽和低差错率的特性。这种传输带宽大、误码率少及传输延迟小的全光网络，寄托了人们的美好理想。但是依照目前的技术水平，要想实现全光网络是非常困难的，在全球或全国广域网上，进行波长调度和传输也难以实现，只能在有限区域的子网内进行透明传输和处理。

考虑到这些因素，ITU-T 2003 年 3 月倾向于暂时放弃或搁置全光网络的概念，转向更为现实的光传输网（OTN）的概念，从半透明开始逐渐向全透明演进。在现有传输网络只有管理平面和传输平面的基础上，引入控制平面，从而构成自动交换光网络（ASON），实现网络资源按需分配的智能化，以便提高网络的生存性、安全性和网络资源的利用率。目前所说的光传输网（OTN）是由高性能的光 – 电转换设备连接众多透明的全光子网的集合。ASON 不限定网络的透明性，也不排除光 – 电转换。ASON 中的“自动”主要指在 ASON 网络中，引入高度智能化的控制平面，根据网络运行的种种需要，遵循标准化的协议所引起的交叉或交换。

ASON 是指在信令系统或管理平面的控制下，完成环状或网状拓扑结构的光传输网节点内不同光通道的自动交换。它支持电交换或光交换，根据需要动态地向光网络申请带宽资源，通过信令系统或管理平面，自主地建立或拆除光通道，而不需要人工

干预。

ASON 网络由控制平面、传送平面和管理平面组成，如图 7-30 所示。ASON 采用多协议标记交换（MPLS）作为路由和信令协议。ASON 有 3 种不同的连接：永久连接、软永久连接和交换连接。永久连接是由网管系统指配的连接，与传统光网络相同。软永久连接由管理平面和控制平面共同完成，用户到网络的连接由管理平面直接配置，而网络部分的连接则由控制平面完成。交换连接是由用户发起呼叫请求，由控制平面实现的一种全新的动态连接。普遍认为，ASON 是下一代光网络的最重要的技术之一。

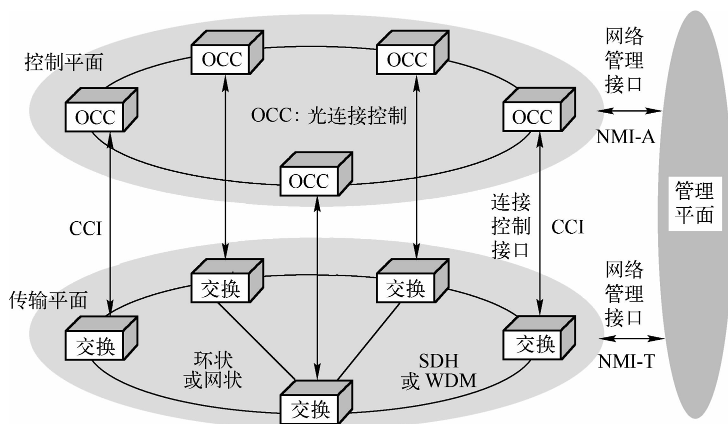


图 7-30　ASON 的体系结构

ASON 是对传统光网络的重大突破，它是从 IP、SDH、WDM 环境中升华而来的，它将 IP 的高效灵活、SDH 的超强生存和 WDM 的超大容量，通过分布式控制系统有机地结合在一起，形成以软件为核心，能感知用户对网络的需求，能按需直接从光层提供服务的新一代光传输网。

图 7-31 表示用 GMPLS/ASON 控制和管理的 IP/SDH/WDM 网络与传统网络的区别。从以上的介绍可知，ASON 也像一个光传输网（OTN）的管理系统。

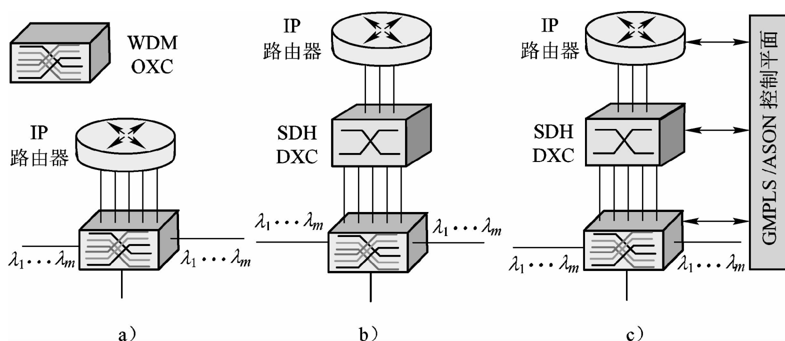


图 7-31　光传输网络的 3 种节点结构

a）IP/WDM　b）IP/SDH/WDM　c）用 GMPLS/ASON 控制和管理 IP/SDH/WDAM 网络

7-25　什么是光正交频分复用（O-OFDM）系统?

为了满足用户的需求，并追求最大的经济效益，人们正在想办法提升现有骨干网的传输速率，现在已有波分复用（WDM）、微波副载波复用（SCM）和光时分复用（OTDM）等方法。但这些方法多多少少都遇到了一些问题，比如密集 WDM 系统使光纤中的光功率密度较大，从而使非线性效应非常突出，而且在接收端需要复杂的色散补偿和均衡，导致系统结构复杂。OTDM 需要复杂的光域信号处理，也有成本过高的缺点。SCM 频谱扩展有限，频谱利用率难以有很大的提高，传输性能也难以有本质的改善。为此，科学家们提出将电域中的正交频分复用（OFDM）用于光域中。

由于有较高的频谱利用率和抗多径干扰的能力，OFDM 技术已被广泛应用于无线、有线和广播通信中。2009 年采用 OFDM 的长期演进（LTE）也成为 4G 标准中的核心技术。

光正交频分复用（Optical OFDM，O-OFDM）技术是近年来出现的一种新型光传输技术，它是正交频分复用技术和光纤通信技术相结合的产物，拥有两者的所有优点。利用在光纤信道中传输 OFDM 信号，可以大幅度提高现有光纤通信系统的性能，使传输速率和传输距离都有很大的提高，同时又不需要进行昂贵的均衡和色散补偿，是一种非常有前景的光传输技术。

O-OFDM 的基本原理和无线 OFDM 系统没有本质上的区别，在系统发送端电信号转化成光信号之前，在接收端光信号转化成电信号之后，对信号的处理流程都基本一致。

问 8-6 ~ 问 8-7 将介绍正交频分复用（O-OFDM）技术在 4G 移动通信网络中的应用，问 8-23 将介绍 OFDM-PON，问 8-25 将介绍一个光正交频分复用（O-OFDM）技术应用到射频信号光纤传输（RoF）无线通信网络中的例子。

7-26　什么是网络生存性?

高速网络中一次通信中断有可能使几百万用户受到影响，所以提供中断的快速修复是许多高速网络的重要需求。通常要求运营商提供的可用性为 99.999%，即相当于每年通信中断的时间少于 5 min。网络的生存性是当网络失效时能够继续为用户提供服务的能力，保护切换是确保网络生存性的关键技术，保护通常以分布式方式执行。

保护和恢复均是在网络故障条件下使受损业务得以重新运行的具体措施，两者均需要重新选择其他路由来替代故障路由。保护路由是在故障发生前就预留的，这些路由不能为其他业务所占用，不过低优先级业务可临时使用，一旦故障发生时这些路由必须让位给保护业务使用。恢复路由不是预留的，而是在故障发生时，依据网络拓扑结构和一定的优化算法为受损业务选取的一条可替代路由。保护要求时间短，一般为 50 ms；而恢复完成时间长，一般要求在 200 ms 或数秒内实现。

当今的网络智能化很高，使用了很多软件，软件故障所引起的可靠性问题已非常突出。在大多数情况下，通信故障是人为引起的，如光缆被切断、工作人员误操作等。与架空光缆或掩埋光缆相比，油气管道内的光缆不易损坏。另一个最常见的故障是节点内光发射机或接收机器件或设备的损坏或失效。

提高网络生存性的方法之一是在网络设计时采用备份制或迂回路由制，如备份路由、备份端机等。

SDH 网络故障修复（或保护切换）时间最多允许 50 ms，这是因

为如果超过这个时间，网络中的某些设备将丢弃音频呼叫。当业务中断时间超过 2 s 时，所有电路交换连接和 2 Mbit/s 拨号业务都将失去连接。如果业务中断时间达到 5 分钟，则数字交换机将出现严重阻塞。而 IP 网络采用尽力而为策略，并不保证网络的可用性和质量，不能保证数据包及时到达目的地，甚至也不能保证它一定能够到达目的地，因为网络阻塞时，它就被丢弃。

生存性措施可以在网络的多个层次采取，但保护通常只在物理层（L1）进行，物理层包括 SDH 层和光传输层。保护也可以在链路层（L2）进行，包括 ATM 层和多协议标记交换（MPLS）层。保护还可以在网络层（L3），比如 IP 层进行。每一层的保护可以阻止一定类型的故障发生，但并不能有效阻止所有类型的失效。

通常 IP 网络恢复需要几分钟的自愈恢复时间，如此低的切换速度会造成大量高速数据的丢失，无法满足通信质量的要求。

ATM 网络使用了虚通道（VP）路由和分级通道复用技术，加入了操作、管理与维护（OAM）信元，采用了动态带宽分配、流量管理和调度技术，使得 ATM 层能够有效、快速地为用户服务，检测出故障，使网络的可靠性大大提高。

SDH 网络采用线路保护方式和具有自愈功能的环网，与 ATM 层的恢复技术相比，其恢复速度更快。

WDM 网络是一个分层的网络，WDM 的恢复方案有保护切换和 OXC 重选路由两种。WDM 的保护切换既可以在光通道层进行，也可以在光复用段层实施，适用于点对点系统和环网；OXC 的重选路由在网状拓扑的光通道层实现。

7-27　如何对 SDH 网络进行保护?

SDH 网络一旦出现故障，将会导致局部甚至整个网络瘫痪，所以网络必须具有自愈功能。所谓自愈功能是指，当网络出现故障时，能够在无需人为干预的条件下，在极短的时间内从失效状态自动恢复到工作状态，使用户感觉不到网络已出现了故障。要想使网络具有自愈功能，网络必须具有备份终端和路由。SDH 的自愈保护分为线路保护切换、环路保护切换、格状网保护恢复及混合保护恢复等方式。

1. 路径保护

除用备份终端保护外，还有线路保护。线路保护有路径保护和路由保护两种结构。

通常，光缆线路系统具有保护切换功能，能提供路径保护和环路保护，如图 7-32 所示。路径保护有 1 +1 保护、1∶1 保护和 1∶n 保护。

1 +1 保护时，保护系统和工作系统在发送端同时一直工作，接收端则对收到的两路信号进行择优选取，如图 7-32a 所示，在两端之间不需要协议信号发送协议。这种保护方式可靠性较高，对于高速大容量系统（例如 STM –16）经常采用，但其成本较高。应该指出，因为连接是全双工的，所以工作光纤和保护光纤各用一对光纤。

1∶n 保护时，n 个工作系统共用一个并列的保护系统，如图 7-32c 所示。当 n 个工作系统中有一个失效时，STM –N 信号可以切换至保护路径传输。平时，不使用保护光纤，所以保护系统可以用来传送低等级的额外业务。一旦发生切换，则主用工作系统的信号将转向备份保护系统传输，备份保护系统原来传输的低等级业务将自行丢失。现在这种应用已经不常使用，不过可以用于尽力而为的 IP 业务。在这种保护方式中，信号发送需要一个自动保护切换（APS）协议。

除 1 +1 保护外，还有 1∶1 保护。1∶1 是 1∶n 保护的特例，如图 7-32b所示，由于1∶1 保护路径可以提供低优先等级的额外业务，因而系统效率高于 1 +1 方式。

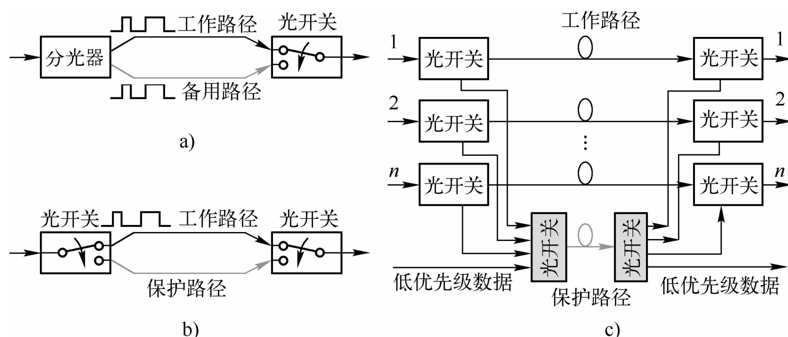


图 7-32　点对点系统的路径保护

a）1 +1 保护　b）1∶1 保护　c）1∶n 保护

在 SDH 网络中，输入到 ADM 或 DXC 的信号一直被监视，如果监测到某条路径的信号光功率低于阈值，则保护切换立即被启动。如果允许修复的时间是 50 ms，那么从监测到失效到完成保护切换要在 10 ms 内完成。

2. 环路保护

SDH 使用环状结构已非常流行，在这种应用中，任何一对节点之间提供两条独立分开的路径。

图 7-33a 和图 7-33b 分别表示 SDH 环路径保护和复用段保护的原理图。在图 7-33a 表示的路径保护情况下，工作正常时，A 节点的输入信号经光纤 1 到节点 B，然后再到节点 C 的输出端；当 BC 间路径失效后，A 节点的输入信号切换到光纤 2，经光纤 2 到节点 E 和 D 到节点 C 的输出端。在图 7-33b 表示的复用段保护情况下，当 BC 段失效后，B 节点将失效段环回（用灰色线表示），输入信号经光纤 2 返回到节点 A，经节点 E 和 D 到节点 C 的输出端。

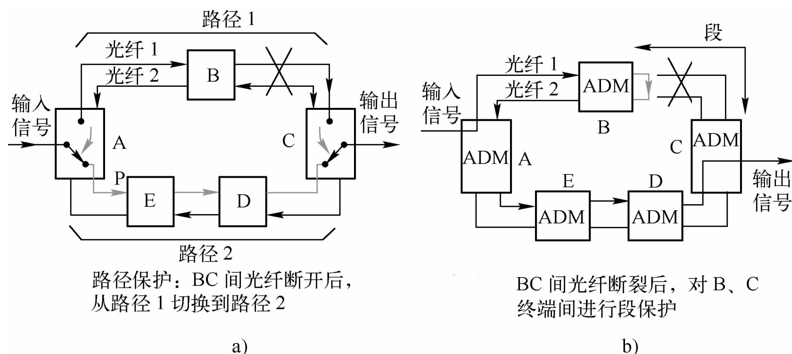


图 7-33　SDH 环路保护

a）路径保护　b）复用段保护

7-28　光纤通信系统按拓扑结构如何分类?

我们可以把光纤通信系统划分为三类，如图 7-34 所示。这些系统用来连接一些节点，这些节点通常可能是交换机、终端、计算机、

工作站和电话机等。在图 7-34 中，从左到右分别表示点对点系统、一点对多点系统以及网络的拓扑结构。在点对点系统中，可能是单向的，也可能是双向的，一端的发射机发送信息到另一端的接收机。在一点对多点（设有 N 个工作站）的系统中，其中站 1 可发送信息到所有其他 $N-1$ 个站，并可能收到他们的回答，但其他站之间不能相互通信。该系统的一个特殊情况是广播网络，即一个站可发送信息到所有其他 $N-1$ 个站。

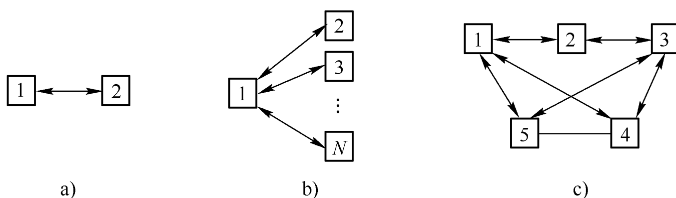


图 7-34　光纤通信系统结构分类

a）点对点　b）一点对多点　c）网络

点对点系统和一点对多点系统仅仅是网络的特例。在网络中，每个站可以与其他任一个站进行通信，而绝不仅仅是一个站只能与另外 $N-1$ 个站通信。有时我们要指出它们之间的区别，有时把以上三种情形统称为系统或者网络。

现在的情况是已经敷设好的长距离干线正在转变成一点对多点系统或网络。前者的应用多半是光纤到家或者是到办公室，而网络的进一步应用将变成局域网、城域网和广域网。

7-29　光纤通信网络按网径大小分成几类?

光纤通信网络依据网径的大小可分为广域网（WAN）、城域网（MAN）和局域网（LAN）。

WAN 指的是在信道集中点、电话交话局、交换中心或者上/下话路之间的长距离传输，传输距离在一个国家内部，通常可达几千千米，可包括通信卫星以及长距离微波和光纤干线。图 7-35 表示宽域网及其与 MAN 和 LAN 的互连。

MAN 是在信息量集中的区域内，例如在一个城市内，两个建筑物内，两个 LAN 之间传输信息的网络，或者用于宽域网（WAN）的本地分配网络。传输距离最远可达 100 km。这种网络通常被认为是夹在 WAN 和 LAN 之间的网络，可认为是到 WAN 的网关。它可包括电话本地网络、商业网络、CATV 用户和社区网络，以及在有限的区域内连接建筑物的专用商业网络。

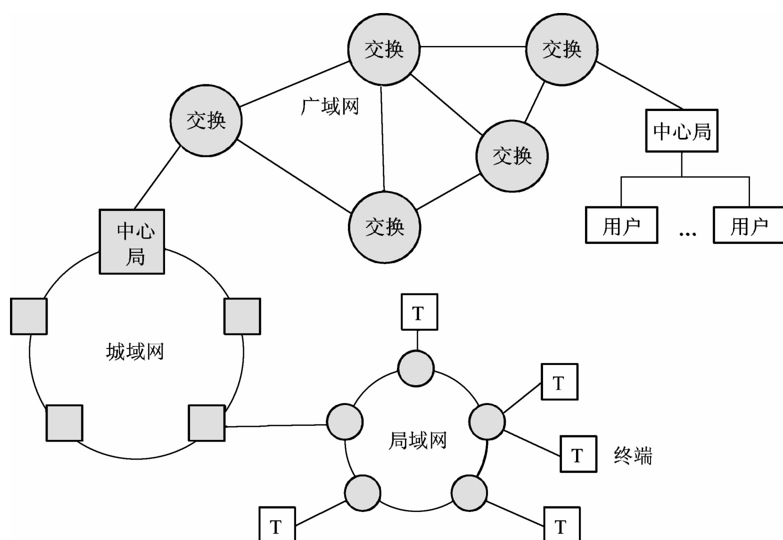


图 7-35　广域网（WAN）与城域网（MAN）和局域网（LAN）的互联

LAN 是一种小范围内的传输网络，它可能仅仅是在一个办公室、一个建筑物内、或者在一个建筑群内的网络，其传输距离最多也只有 10 km。它包括连接主机、存储设备、数据终端以及其他外围设备的专用计算机网络，例如可包括以太网、IBM 信令环及光纤分布数据接口（FDDI）等。

第 8 章　光 接 入 网

8-1　接入网在网络建设中有什么作用?

信息网由核心骨干网、城域网、接入网和用户驻地网组成，其模型如图 8-1 所示。由图可见，接入网处于城域网/骨干网和用户驻地网之间，它是大量用户驻地网进入城域网/骨干网的桥梁。

目前，科学技术突飞猛进，大量的电子文件不断产生，随着经济全球化，社会信息化进程的加快，互联网大量普及，数据业务猛烈增长，电信业务种类不断扩大，已由单一的电话业务扩展到多种业务。窄带接入网已成为制约网络向宽带化发展的瓶颈。接入网市场容量很大，为了满足用户的需求，新技术不断涌现。接入网是国家信息基础设施的发展重点和关键，网络接入技术已成为研究机构、通信厂商、电信公司和运营部门关注的焦点和投资的热点。

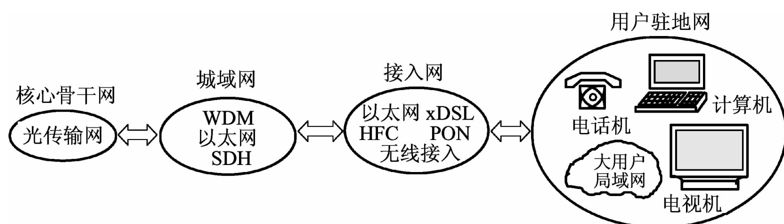


图 8-1　信息网模型

8-2　光接入网技术是怎样演进的?

在接入技术方面，窄带接入逐渐被宽带接入所取代，铜缆接入已逐渐被光缆接入所取代，最终实现光纤到家。

光纤接入有无源与有源之分，基于同步数字制式（SDH）或准同步数字制式（PDH）的光纤接入是有源接入，基于无源光网络（PON）的接入是无源接入。由于PON具有独特的优点，它能够提供透明宽带和低成本的传送能力；与有源光网络相比，它的安装、开通和维护运营成本低，系统更可靠、更稳定，因此接入网正在大量应用PON系统。

异步传输模式（ATM）技术支持可变速率业务，支持延时要求较小的业务，具有支持多业务多比特率的能力，因此ATM接入系统能够完成不同速率的多种业务接入，它既能够提供窄带业务，又能提供宽带业务，即能提供全业务接入。另外，电信网的核心部分正在ATM化，为了使用户接入网部分的PON和核心网的ATM化相兼容，ITU-T自1998年以来，已完成了一整套G. 983建议，其目的就是使PON携带的信息ATM化，这种ATM化的PON称为APON，利用APON构成的网络是一种全业务接入网（FSAN）。但是，G. 983. 1规定APON接入网传输系统下行传输速率最高为622 Mbit/s，随着PON分光比的增加，光网络单元（ONU）数也随之增多，每个ONU所用的带宽就有限。

随着互联网的快速发展，以太网被大量使用，由于市场的推动，以太网技术也得以飞速发展。在20世纪80年代它仅是一种局域网（LAN）技术，其传输速率为10 Mbit/s。90年代发展了交换型以太网，并先后推出了快速（100 Mbit/s）以太网、吉位（Gbit/s）以太网。进入21世纪，先后出现了10 Gbit/s以太网和40 Gbit/s以太网，其传输介质也由双绞线变为多模光纤（MMF）或单模光纤（SSMF），它的应用也从局域网（LAN）发展到宽域网（WAN）。不久的将来100 Gbit/s的以太网也将商用。

2000年12月，以太网设备供应商提出了将PON用于以太网接入的标准研究计划，这种使用PON的以太网称为EPON。EPON与APON相比，上下行传输速率比APON的高，EPON提供较大的带宽和较低的用户设备成本，除帧结构和APON不同外，其余所用的技术与G. 983建议中的许多内容类似，如下行采用TDM，上行采用TDMA。2004年6月，由EFM工作组起草制订的以太网PON标准IEEE 802. 3ah正式获得通过，该标准规定传输速率上下行均为1. 25 Gbit/s。IEEE在2006年

成立了一个 TaskForce 工作组，进行 10 Gbit/s EPON 标准 IEEE 802.3av 的研究和制订工作，已于 2009 年 9 月正式发布。

提倡 EPON 的人相信，随着 EPON 标准的制订和 EPON 的使用，在 WAN 和 LAN 连接时将减少 APON 在 ATM 和 IP 间转换的需要。

鉴于 APON 标准复杂，成本高，在传输以太网和 IP 数据业务时效率低，以及在 ATM 层上适配和提供业务复杂。而 EPON 存在两大致命的缺陷，即带宽利用率低和难以支持以太网之外的业务。因此，全业务接入网（FSAN）组织已制订了一种融合 APON 和 EPON 的优点，克服其缺点的新的 PON，那就是 GPON（千兆无源光网络）。GPON 具有吉比特高速率，92% 的带宽利用率和支持多业务透明传输的能力，同时能够保证服务质量和级别，提供电信级的网络监测和业务管理。

早在 2001 年 IEEE 制订 EPON 标准的同时，全业务接入网（FSAN）组织开始发起制订速率超过 1 Gbit/s 的 PON 网络标准，即 GPON（Gigabit Capable PON）。随后，ITU-T 也介入了这个新标准的制订工作，并于 2003 年 1 月起制订了一系列标准。

GPON 与 EPON 的主要区别在二层协议上，一个采用以太网协议，一个采用 GPON 成帧协议。两种技术下行均采用广播方式，上行均采用时分多址（TDMA）方式。

APON、EPON 和 GPON 都是 TDM-PON。APON 较低的承载效率以及在 ATM 层上适配和提供业务复杂等缺点，现在已渐渐淡出人们的视线。而 EPON 存在两大致命的缺陷，即带宽利用率低和难以支持以太网之外的业务。GPON 虽然能克服上述的缺点，但上下行均工作在单一波长，各用户通过时分方式进行数据传输。这种在单一波长上为每个用户分配时隙的机制，既限制了每用户的可用带宽，又大大浪费了光纤自身的可用带宽，不能满足不断出现的宽带网络应用业务的需求。在这种背景下，人们就提出了 WDM-PON 的技术构想。WDM-PON 能克服上面所述的各种 PON 缺点。近年来，由于 WDM 器件价格的不断下降，WDM-PON 技术本身的不断完善，WDM-PON 接入网应用到通信网络中已成为可能。相信随着时间的推移，把 WDM 技术引入接入网将是下一代接入网发展的必然趋势。

正交频分复用（OFDM）具有较高的频谱利用率和抗多径干扰的能力，已被广泛应用于无线、有线和广播通信中，近年来有人又将

它引入无源光网络（PON）中，出现了 OFDM-PON。

射频信号光纤传输（RoF）可以为用户提供宽带无线接入服务。

中国电信从 2011 年起，将以 PON 技术为基础构建“百兆进户、千兆进楼”的宽带网络能力，计划使城市地区的新增光纤入户家庭达到 3 000 万，是“十一五”期间总用户的 3 倍，并计划分别在 2013 年和 2015 年，将这一数字提高到8 000万户和 1 亿户。

8-3　什么是三网融合？为什么说它是接入网的发展趋势？

由于历史的原因，我国存在着各自独立经营的电信网、互联网和广播电视网。为了使有限而宝贵的网络资源最大限度地实现共享，避免大量低水平的重复建设，打破行业垄断和部门分割，三网融合是信息网发展的必然趋势。

所谓三网融合就是将归属于工业和信息化部的电信网、互联网和归属于广电总局的广播电视网在技术上趋向一致，网络层互联互通，业务层互相渗透交叉，应用层使用统一的协议，经营上互相竞争合作，政策层面趋向统一。三大网络通过技术改造均能提供语音、数据和图像等综合多媒体的通信服务。

要想实现三网融合，如图 8-2 所示，首先，各网必须在技术、业务、市场、行业、终端和制造商等方面进行融合，转变成电话综合网、数据综合网和电视综合网。这三种网可能在相当长一段时间内长期共存，互相竞争，最后三网才能融合成一个统一的网。

三网融合的技术基础是：

数字技术：电话、数据和图像业务都可以变成二进制“1”和“0”信号在网络中传输，无任何区别。

光通信技术：为各种业务信息传送提供了宽敞廉价高质量的信息通道。

软件技术：通过软件可支持三大网络各种用户的多种业务。

外部环境促使三网融合，市场需求和竞争、政策法规推动三网融合，1996 年美国国会通过了电信改革法案，解除了对三网融合的禁令，允许电信企业对有线电视业务展开竞争；作为交换，有线电

视运营商也可以进入本地电话业务市场。

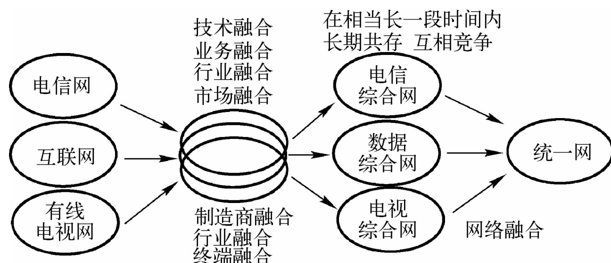


图 8-2　三网融合示意图

三网融合对信息产业结构的影响将导致不同行业、公司的并购重组或业务扩展；导致各自产品结构的变化；导致市场交叉、丢失和获取。计算机可用来打电话、购物，电视机可以上网，移动电话可查询股市行情，软件公司可以提供电信业务，娱乐公司可以提供 Internet 服务，电信公司可以从事银行业务和零售批发等已逐渐变成了现实。

8-4　何谓无源光网络？目前有哪几种无源光网络？

在无源光网络中，使用无源光器件实现光的连接和光的分路/合路，所以这种光分配系统称为无源光网络（PON）。主要的无源光器件有：单模光纤光缆、光连接器、光分路器或阵列波导光栅（AWG）和光纤接头等。

目前有异步传输模式（ATM）PON（APON）、以太网 PON（EPON）、吉比特 PON（GPON）、波分复用 PON（WDM-PON）和正交频分复用 PON（OFDM-PON）。

8-5　下行复用采用哪几种技术？

下行复用可以采用电复用和光复用。最简单经济的电复用是 OLT 采用时分复用（TDM），将分配给各个 ONU 的信号按一定的规律插入时隙中。在接收端，ONU 把给自己的有效载荷从合路信号中再分解出来。

对于光复用，可以采用密集波分复用（DWDM），给每个 ONU 分配一个下行波长，将分配给各个 ONU 的信号直接由该波长载送。

在接收端，ONU 使用光滤波器再从 WDM 信号中分解出自己的信号波长，因此每个 ONU 都要配备相当昂贵的特定波长接收机。

在 PON 接入系统中，信道复用是为了充分利用光纤的传输带宽，把多个低容量信道以及开锁信息，复用到一个大容量传输信道。在电域内，信号复用可分为时分复用（TDM）、频分复用（FDM）、码分复用（CDM）和正交频分复用（OFDM）；而在光域内，光信号复用也有光时分复用（OTDM）、波分复用（WDM）、光码分复用（OCDM）和光正交频分复用（O-OFDM）。

8-6　上行接入采用哪几种技术？3G 和 4G 移动通信网络各采用何种接入技术？

在点对点的系统中，信道的接入称为复用，而在接入网中则称为多址接入。所以对应的频分复用称为频分多址接入（FDMA），在光域内的频分复用则称为波分复用（WDM）；对应的时分复用称为时分多址接入（TDMA）；对应的码分复用则称为码分多址接入（CDMA）；对应的正交频分复用称为正交频分多址接入（OFDMA），如图 8-3 所示。也可以综合使用几种接入方法。目前的 PON 均使用 TDMA 技术，而第 3 代（3G）移动通信使用 CDMA 技术，而第 4 代（4G）移动通信则使用正交频分多址接入（OFDMA）。

时分多址接入（TDMA）是把传输带宽划分成一列连续的时隙，根据传送模式的不同，预先分配或者根据用户需要分配这些时隙给用户。

由于光纤的传输带宽很宽，所以可以采用波分多址接入（WDMA）技术实现多个 ONU 的上行接入。每个 ONU 用一个特定的波长发送自己的数据给 OLT，各个波长的光信号进入光分路器后复用在一起，OLT 使用滤波器或阵列波导光栅（AWG）解复用器将它们分开，然后送入各自的接收机将光信号变为电信号。

码分多址接入（CDMA）系统是一种扩频多址接入技术，它允许多个用户使用同一个物理介质，在同一个电载频上同时传送比用户基带频谱宽得多的信息。在 CDMA 发送端，每个信道采用互不相同的地址码调制所发送的信号；在接收端，采用与要接收信道相同的地址码进行相关检测，即对每个信道的编码进行反转换，就可以

从混合信号中选出想要的信道来（见图 8-7）。

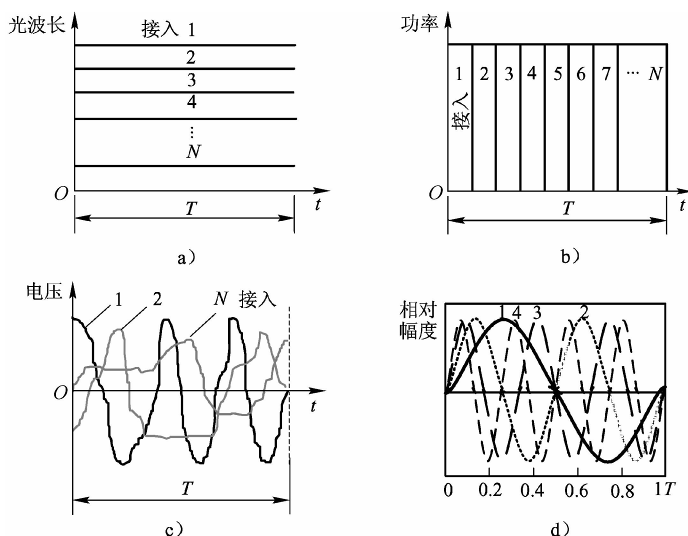


图 8-3　四种基本的多址接入技术

a）波分多址（WDMA）　b）时分多址（TDMA）

c）码分多址（CDMA）　d）正交频分多址（OFDMA）

和 CDMA 一样，正交频分多址接入（OFDMA）也是一种多载波调制技术，同时也是一种复用技术。该技术将信道分成若干个相互正交的副载波（子）信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，然后分别调制到每个副载波上发送传输。OFDMA 与传统的频分复用（FDM）原理基本类似，即把高速的串行数据流通过串并转换，分割成低速的并行数据流，分别调制到若干个副载波频率子信道中并行传输。不同的是，正交频分技术利用了各个载频之间频域的“正交”特性和时域的重叠特性（见图 8-4），使各副载波信号互不干扰，而频谱利用率又比传统的频分复用高，可利用数字信号处理（DSP）芯片实现部分功能。可使用快速离散傅里叶逆变换和离散傅里叶变换来实现 OFDM 系统中的调制和解调，从而大大简化了 OFDM 发送端和接收端的结构。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开，这样可以减少子信道之间的相互干扰。而且由于每

个子信道的带宽仅仅是原信道带宽的一小部分，信道均衡变得相对容易。OFDM 技术的最大优点是能对抗频率选择性衰落或窄带干扰。因此 OFDMA 是第 4 代（4G）移动通信网络中的核心技术。

8-7　为什么正交频分复用（OFDM）各副载波信号可以互不干扰而频谱利用率又高?

图 8-4a 表示 OFDM 信号频域图，由图可见，在每个副载波信号的最大处，所有其他副载波信号正好为零。利用这一特性，使用离散傅里叶变换，使各个副载波信号最大点正好落在这些具有正交性的点上，因此就不会有其他副载波的干扰。所以可以从多个在频域相互正交而时域相互重叠的多个副载波信道中，提取每个副载波的符号，而不会受到其他副载波的干扰。

图 8-4 表示 OFDM 副载波的时域图和频域图的对应关系，其中图 8-4a 表示 OFDM 的频域图，图 8-4b 表示与 OFDM 频域图相对应的 OFDM 时域图。从数字与模拟通信系统的教科书中，我们知道，加窗（在 0 ~ T 内加窗）正弦波形的时域图（图 8-4b）经傅里叶变换后的频域图就是图 8-4a。

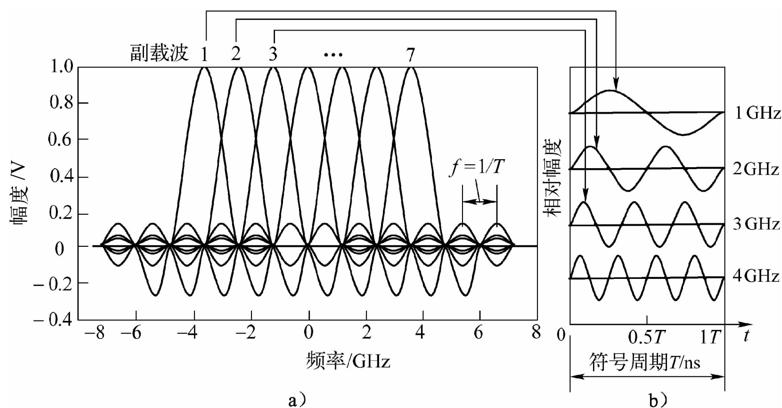


图 8-4　OFDM 信号频域图和时域图的对应关系

a）OFDM 信号频域图（各副载波频域相互正交）

b）与频域图相对应的 OFDM 信号时域图

8-8　4G 移动通信还用到哪些关键技术?

4G 移动通信除用到正交频分多址接入（OFDMA）技术外，还用到多入多出（MIMO）技术、软件无线电（SDR）技术、IPv6 协议技术和智能天线技术等。

多入多出（MIMO）技术应用的目的是利用多天线来抑制信道衰落。MIMO 技术是一种空间复用技术，它是在接收端和发射端使用多个天线，充分利用空间传播中的多径分量，在同一频带上使用多个数据通道（MIMO 子信道）发射信号，从而使得容量随着天线数量的增加而线性增加，如图 8-5 所示。这种信道容量的增加不占用额外的带宽，也不消耗额外的发射功率，因此是增加信道和系统容量的一种非常有效的手段。MIMO 系统和现有基站采用的一发两收（SIMO）系统结构相比，降低了码间干扰（ISI），提高了空间分集增益、无线信道容量和频谱利用率。同时 MIMO 系统也可以利用其提供的空间复用增益提高信道的可靠性，利用 MIMO 信道提供的空间分集增益降低系统误码率。MIMO 系统在一定程度上可以抗多径衰落，但对于频率选择性衰落，仍然是无能为力。而 OFDM 将总带宽分割为若干个窄带子载波，从而可以有效地抵抗频率选择性衰落。因此，将两者结合起来，可充分开发这两种技术的潜力。MIMO + OFDM 将利用时间、频率和空间三种分集技术及空间资源，既可以使系统达到很高的传输效率，提高频谱利用率；又可以通过分集达到很高的可靠性，大大增加无线系统对抗噪声、干扰、多径的容限，从而成为第 4 代移动通信系统核心技术的解决方案。



图 8-5　多输入多输出（MIMO）系统与单输入多输出（SIMO）的比较

a）单输入多输出（SIMO）　b）多输入多输出（MIMO）

软件无线电（SDR）技术采用数字信号处理（DSP）技术，在可编程控制的通用硬件平台上，利用软件来定义实现无线电台的各部分功能，包括前端接收、中频处理以及信号基带处理等。即整个无线电台从高频、中频、基带直到控制协议全部由软件编程来完成。其核心思想是在尽可能靠近天线的地方使用宽带的数/模转换器，尽早地完成信号的数字化，从而使得无线电台的功能是一种基于 DSP 的芯片、以软件为核心的崭新的无线通信体系结构。

IPv6 协议技术，4G 系统选择采用基于 IP 全分组的方式传输数据，因此 IPv6 将成为下一代移动网络的核心协议。IPv6 的突出优点是，地址字段采用 128 位，具有巨大的地址空间，而且可进行地址的自动配置，可给移动终端配备一个全球唯一的 IP 地址，作为身份的标志。

智能天线（SA）技术采用空分多址（SDMA）技术，利用信号在传输方向上的差别，将同频率、同时隙或同码道的信号区分开来，最大限度地利用有限的信道资源。智能天线是由多个天线单元组成的天线阵列，在通信过程中根据信号波传来的方向，自适应动态调整各个天线单元的方向图，跟踪强信号，减少或抵消干扰信号，形成在空间针对用户的波束，此波束会随用户移动而移动，始终跟随用户。智能天线除了提供高的天线增益外，还能提供几倍的分集增益。但是它要求每个天线有一个接收机。智能天线具有抑制信号干扰，提高信噪比，降低小区内和小区间干扰的能力，所以它能提高系统通信质量和容量，降低系统整体造价。3G 系统也使用该技术。

另外，还有无线链路增强技术、多用户检测技术、切换技术和高性能接收技术等。

8-9　时分多址接入（TDMA）是如何实现的?

图 8-6 表示一个树形 PON 的 TDMA 系统，该系统允许每个用户在指定的时隙发送上行数据到 OLT。OLT 可以根据每个时隙位置或时隙本身发送的信息，取出属于每个 ONU 的时隙数据。在下行方向，OLT 采用 TDM 技术，在规定的时隙发送数据给每个 ONU。

在使用 TDMA 技术的树形 PON 中，上行接入采用突发模式，一个重要特点是必须保证 ONU 上行时隙的同步，所以必须采用测距技术，以便控制每个 ONU 的发送时间，确保各 ONU 发送的时隙插入指定的位置，避免在组成上行传输帧时发生碰撞。为防止各 ONU 时隙发生碰撞，要求时隙间留有保护间隙 T_{gap}。测距精度通常为 1～2 bit，所以各 ONU 信元在组成上行帧时的间隙 T_{gap} 有几个比特，因此到达 OLT 的信元几乎是连续的比特流。ONU 占据多少时隙由媒质接入控制协议（MAC）完成，ONU 何时发送数据时隙（即在收到数据发送授权后延迟多长时间），由 OLT 根据测距（测量 ONU 到 OLT 的距离）结果通知 ONU。

在突发模式接收的 TDMA 系统中，除要求 OLT 测量每个 ONU 到 OLT 的距离外，还要求 OLT 利用上行突发数据时隙开始的前几个比特尽快地恢复出采样时钟，并利用该时钟进行该时隙数据的恢复。也就是说同步电路必须能够确定突发时隙信号到达 OLT 的相位和开始时间，同时还要为测距计数器提供开始计数和计数终了的时刻。

在使用 TDMA 技术的树形 PON 中，OLT 突发模式接收机接收从不同距离的 ONU 发送来的数据包，并恢复它们的幅度，正确判决它们是“1”还是“0”。由于每个 ONU 的 LD 发射功率都相同，但它们到达 OLT 的距离互不相同，所以它们的数据包到达 OLT 时的功率变化很大，如图 8-6 所示。OLT 突发模式接收机必须能够应付这些功率的变化，正确恢复出数据，不管它们离 OLT 多远。

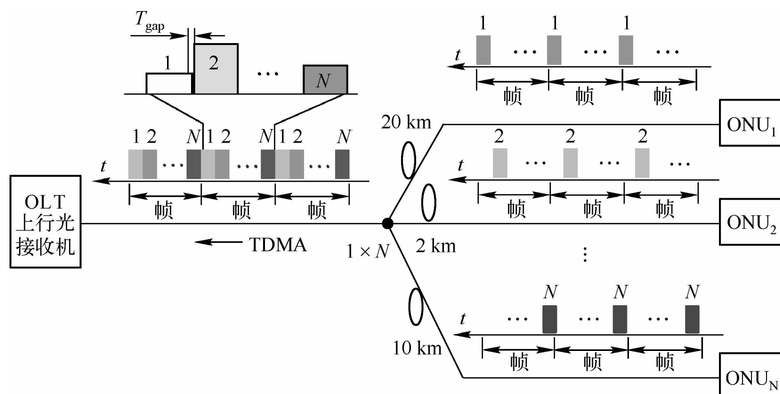


图 8-6　PON 系统各 ONU 采用 TDMA 突发模式接入

8-10 移动通信使用光纤传输吗?

虽然我们的手机是从空中接收电波信号的，但是这些信号大部分时间、最长的距离是用光纤传输的。如果你和北京的朋友用手机通信，除了要通过长途骨干网外，在北京和你所在地的移动业务交换中心和基站之间的通信也是用光纤传输的。

如果用光波代替电波传输 CDMA 信号，那么就构成了一个简单的如图 8-7 所示的 CDMA 光纤传输系统。图中的 W_i 只是一种地址码，由于用封闭的光纤信道传输，不会与其他载波信号发生干扰，所以这里用不着伪随机码扩频，系统很简单，但是这里就是一个固定的光纤传输系统。为了充分利用光纤的带宽，可以在 CDMA 的基础上，再利用副载波多址接入（SCMA）技术，扩大用户数，如图 8-8 所示。此时，载波 f_{ci} 只是高频电磁波，相当于 SCM 中的载波。

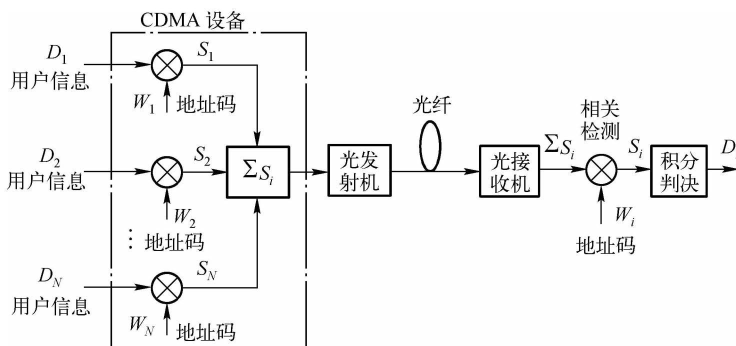


图 8-7 光纤传输 CDMA 通信系统原理图

图 8-9 表示单纤双向 CDMA 树形 PON 接入网原理图，为了将上行和下行波长信号分开和复合，在光发射端和接收端均采用了波分复用（WDM）器件，WDM 器件的输出和输入和 CDMA 设备相连，它除了完成码分复用和解复用的功能外，还应该完成移动业务交换中心（MSC）的功能，即对它所覆盖区域中的移动台进行呼叫控制、交换和无线资源管理等功能，同时还是与其他公用通信网的接口。

通常光纤用于移动局到移动局或移动局到市话局的传输，如图 8-10所示。

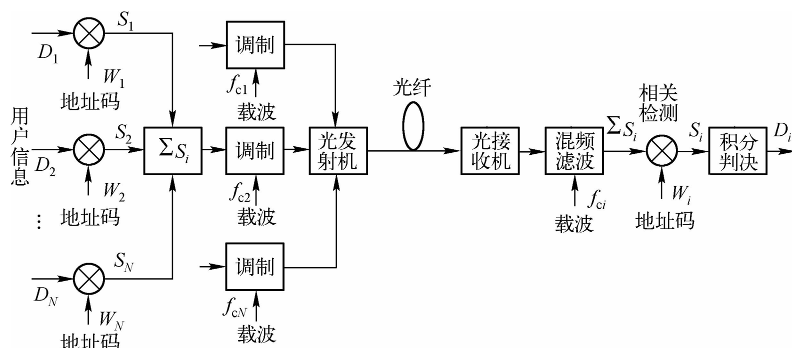


图 8-8　同时使用 CDMA 和 SCMA 的移动通信系统原理图

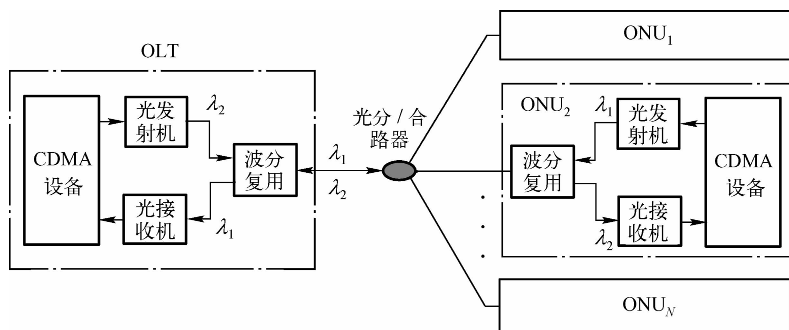


图 8-9　CDMA 树形 WDM-PON 接入网原理图

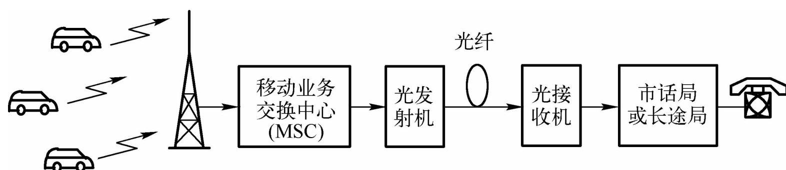


图 8-10　光纤用于移动局到移动局或市话局的传输

8-11　什么是 EPON？它与 APON 有什么不同？

使用 PON 的以太网称为 EPON，EPON 与 APON 相比，上下行传输速率比 APON 的高，除帧结构和 APON 不同外，其余所用的技术与 G. 983 建议中的许多内容类似，如下行采用 TDM，上行采用 TDMA。2004 年通过的 IEEE 802. 3ah 以太网标准规定，传输速率上下行均为 1. 25 Gbit/s。2009 年通过的 IEEE 802. 3av 标准对 10 Gbit/s EPON 又进行了规范。

EPON 和 APON 的主要区别是，在 EPON 中，根据 IEEE 802. 3 以太网协议，传送的是可变长度的数据包；而在 APON 中，根据 ATM 协议的规定，传送的是包含 48 字节的净荷和 5 B 信头的 53 字节的固定长度信元。IP 要求将待传数据分割成可变长度的数据包，最长可为 65 535 字节。与此相反，以太网适合携带 IP 业务，与 ATM 相比，极大地减少了开销。

8-12　10 G EPON 如何与 1 G EPON 兼容？

10 Gbit/s EPON 绝大部分继承了 1 Gbit/s EPON 的标准，仅针对 10 Gbit/s 的应用，对 EPON 的 MPCP 协议（IEEE 802. 3）以及媒质相关 PMD 层进行了扩展。在业务互通、管理与控制方面，与 1 Gbit/s EPON 兼容，如图 8-11 所示，下行采用双波长波分复用，上行采用

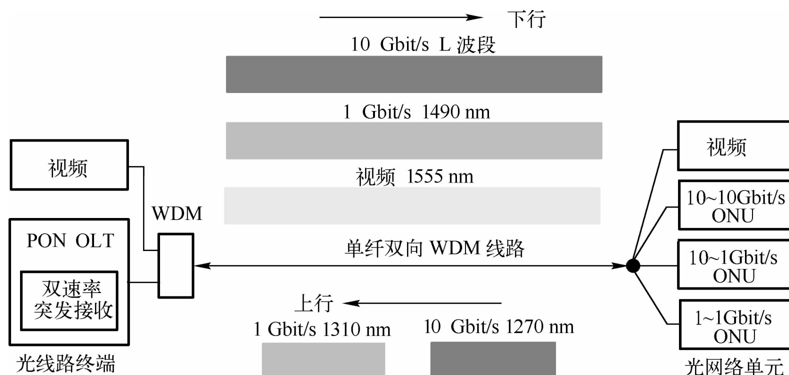


图 8-11　10 Gbit/s EPON 与 1 Gbit/s EPON 系统共存兼容与波长分配示意图

双速率突发模式接收技术，通过 TDMA 机制协调，10 Gbit/s EPON 的 ONU 与 1 Gbit/s EPON 的 ONU 在同一个光分配网络（ODN）下实现了良好共存，有效地保护了运营商的投资。

8-13　为什么 PON 系统上行方向均选用 1 260 ~ 1 360 nm 波长的发射机，而下行方向则选用 1 480 ~ 1 500 nm 波长的发射机？

PON 系统上行方向均选用 1 260 ~ 1 360 nm 波长的发射机，而下行方向则选用 1 480 ~ 1 500 nm 波长的发射机。之所以这样选择，是因为对于实现单纤双向传输采用的 WDM 是适合的，如图 8-11 所示，因为 1 310/1 490 nm 两波长的波分复用技术成熟，器件成本低，应用普遍。其次，上行工作波长选择 1 310 nm 波长，而下行工作波长选择 1490 nm 波长（数据）和 1 550 nm 波长（视频）是为了降低 PON 系统的成本。我们知道，PON 系统是由一个 OLT 和多个 ONU 组成的网络，OLT 的费用是由多个 ONU（用户）共同分摊的，而 ONU 的成本费用因其数量多，对整个 PON 系统的成本影响很大，所以降低 ONU 的成本是关键。ONU 成本的很大一部分来源于光收发器。上行工作波长选择色散小的 1 310 nm 波段，这就使 ONU 激光器可以采用光谱较宽的廉价 F-P 激光器，而不必选择谱宽窄的单纵模昂贵 DFB 激光器。下行工作在色散大的 1550 nm 波段，OLT 激光器必须采用 DFB 激光器，因一个系统只有一个 OLT，其成本费用可由多个 ONU 分摊。

8-14　为什么要提出 GPON？

APON 标准复杂，成本高，在传输以太网和 IP 数据业务时效率低，在 ATM 层上适配和提供业务复杂。而 EPON 存在两大致命的缺陷，即带宽利用率低和难以支持以太网之外的实时业务。因此，全业务接入网（FSAN）组织制订了一种融合 APON 和 EPON 的优点，克服其缺点的新的 PON，那就是 GPON。GPON 具有吉比特高速率，92% 的带宽利用率和支持多业务透明传输的能力，同时能够保证服务质量和级别，提供电信级的网络监测和业务管理。

图 8-12 表示当前 GPON 系统的参考结构，GPON 主要由光线路终端（OLT）、光分配网（ODN）和光网络单元（ONU）三部分组成。OLT 位于接入网局端，它的位置可以就在局内本地交换机的接口处，也可以是野外的远端模块，为接入网提供网络侧与核心网的接口，并通过一个或多个 ODN 与用户侧的 ONU 通信。OLT 与 ONU 是主从关系，它控制、实时监控各 ONU，并执行、管理和维护整个无源光网络。

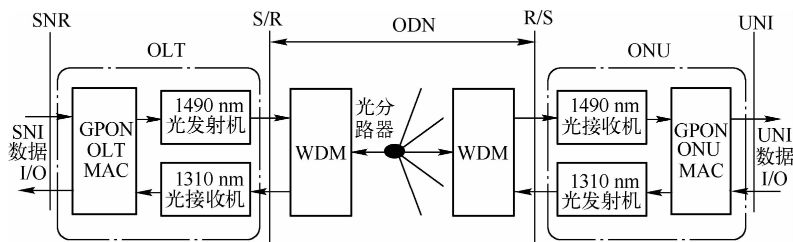


图 8-12　GPON 系统参考结构

ODN 是一个连接 OLT 和 ONU 的无源设备，它的主要功能是完成光信号功率的分配任务。GPON 上、下行数据流可以采用波分复用技术，通过在 ODN 中加载 WDM 模块，在一根光纤上传送上、下行数据。下行使用 1 480 ~ 1 500 nm 波段，上行使用 1260 ~ 1360 nm 波段。同时，GPON 的 ODN 光分路器的性能也大大提高，可支持 1∶128 分路比。

8-15　GPON 与 EPON 比较有哪些优势?

从带宽利用率、成本、多业务支持、OAM 功能等多方面比较发现，GPON 比 EPON 要好：

（1）带宽利用率

一方面，EPON 使用 8B/10B 编码，其本身就引入了 20% 的带宽损失，1. 25 Gbit/s 的传输速率在处理协议之前实际上就只有 1 Gbit/s 了。GPON 使用扰码作线路码，只改变码，不增加码，所以没有带宽损失；另一方面，EPON 封装的总开销约为调度开销总和的 34. 4%，而 GPON 在同样的包长分布模型下，得到 GPON 的封装开销反约

为 13.7%。

（2）成本

从单比特成本来讲，GPON 的成本要低于 EPON。

（3）多业务支持

EPON 传输传统的 TDM 业务，容易引起 QoS 的问题。而 GPON 特有的封装形式，使其能很好地支持 ATM 业务和 IP 业务，做到了真正的全业务。

（4）OAM 功能

EPON 仅规范了远端故障指示、远端环回控制和链路监视等基本功能，而其他一些高级 OAM 功能，则由厂商在设备中自主增加。而 GPON 的 OAM 功能，包括带宽授权分配、动态带宽分配（DBA）、链路监视、保护倒换、密钥交换以及各种告警功能。从标准上看，GPON 的 OAM 信息比 EPON 的丰富。

8-16　GPON 有哪两种传输模式？为什么 GPON 能够支持实时业务？

GPON 有两种传输模式：一种是 ATM 模式，另一种是 GPON 封装（GEM）模式。GPON 在传输过程中，可以用 ATM 模式，也可以用 GEM 模式，也可以共同使用这两种模式。究竟使用哪种模式，要在 GPON 初始化的时候进行选择。

GEM 对 TDM 数据的封装是将 TDM 业务直接映射到可变长的 GEM 帧中，即 TDM over GEM。这种方式是 ITU-T G.984.3 在附录中专门为 GPON 系统承载 TDM 业务所设计的一种封装技术。

由于用户数据帧的长度是随机的，如果用户数据帧的长度超过 GEM 协议规定的净荷最大长度，就要采用 GEM 的分段机制。GEM 的分段机制把超过净荷最大长度的用户数据帧分割成若干段，每一段的长度与 GEM 净荷最大长度相等，并且在每段的前面加上一个 GEM 帧头。这种分段机制，对于一些时间比较敏感的业务，如语音业务，可保证以高优先级进行传输。因为它总是把语音业务放在净荷区的前端发送，而且帧长是 125 μs，延时比较小，从而能保证语音业务的 QoS。

GEM 使用不定长的 GEM 帧对 TDM 业务字节进行分装。TDM over GEM 方式的优点在于使用了与 SDH 相同的 125 μs 的 GEM 帧，使得 GPON 可以直接承载 TDM 业务，将 TDM 语音和数据直接映射到 GEM 帧中，使得分装效率提高。

8-17　为什么要提出 WDM-PON？

目前的 PON 技术主要有 APON、EPON 和 GPON，它们都是 TDM-PON。APON 承载效率低，在 ATM 层上适配和提供业务复杂。EPON 存在两大致命的缺陷，即带宽利用率低和难以支持以太网之外的业务，特别是承载话音/TDM 业务时会引起 QoS 问题。GPON 虽然能克服上述缺点，但上下行均工作在单一波长，各用户通过时分的方式进行数据传输。这种在单一波长上为每用户分配时隙的机制，既限制了每用户的可用带宽，又大大浪费了光纤自身的可用带宽，不能满足不断出现的宽带网络应用业务的需求。在这种背景下，人们就提出了 WDM-PON 的技术构想。

WDM-PON 有三种方案：第一种是每个 ONU 分配一对波长，分别用于上行和下行传输，从而提供了 OLT 到各个 ONU 固定的虚拟点对点双向连接；第二种是 ONU 采用可调谐激光器，根据需要为 ONU 动态分配波长，各 ONU 能够共享波长，网络具有可重构性；第三种是采用无色 ONU，即 ONU 无光源方案。

8-18　如何构成波长固定 WDM-PON？

波长固定 WDM-PON 是一种点对多点（PTM）系统，下行复用采用 WDM 方式，上行接入采用 WDMA 技术。它与功率分配 PON（PS-PON）的根本区别在于，在 ODN 中采用波导光栅（AWG）复用/解复用器（见问 3-10）取代了无源分路器，完成 ONU 在频域复用或解复用的功能。结果是既获得了 PTM 拓扑的光纤增益，又通过 OLT 和 ONU 之间专用波长连接得到了点对点（PTP）系统结构的优点。因此，WDM-PON 有可能胜过 TDM-PON 和 PTP 结构。常见的 WDM-PON 结构如图 8-13 所示。它既支持单纤传输，也支持双纤传输。

在这种 WDM-PON 接入网中，OLT 中有多个不同波长的光源，每个 ONU 也使用特定波长的光源，各点对点连接都按预先设计的波长进行配置和工作，多个不同波长同时工作。在这种接入网中，每个用户的发送和接收信道分别使用单独的波长，因而不需要定时和网络同步。在 TDM-PON 中担当光功率分配的 PON，在 WDM-PON 中，已由完成波分复用/解复用器功能的阵列波导光栅（AWG）替代；在 OLT 中，为了实现 DWDM 的功能，采用了能够产生多个波长输出的光发射机和接收机阵列。

产生多波长输出的光发射机阵列是一个单片集成器件，采用单旋钮进行调谐，以便降低成本，提高可靠性。可把 DFB 激光器阵列与 AWG 功率分配器集成在一起使用。也可以使用多频激光器，这种器件的频率间距很精确，也不需要使用功率分配器。

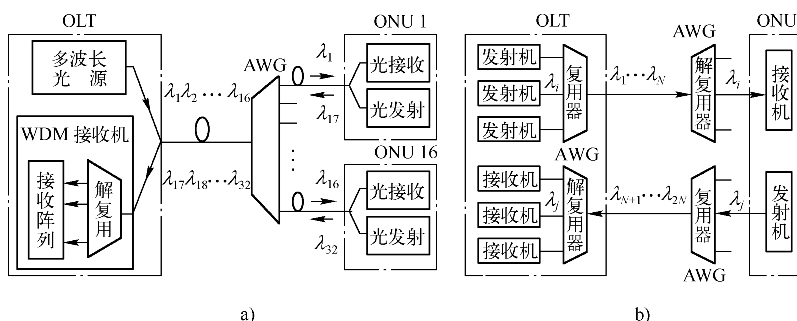


图 8-13　波长固定 WDM-PON

a）波长固定单纤 WDM-PON　b）波长固定双纤 WDM-PON

8-19　如何构成 ONU 波长可调 WDM-PON?

ONU 波长可调 WDM-PON，如图 8-14 所示，其下行传输与固定波长方案相同，但上行传输方案不同。在上行方向，根据需要为 ONU 动态分配波长，各 ONU 能够波长共享，网络具有可重构性。上行传输时，ONU 先使用控制信道向 OLT 发送传输申请，OLT 为 ONU 分配波长，并在下行帧中通知 ONU，ONU 收到分配信息后，调谐到分配给自己的波长上发送数据。在这种方案中，ONU 需要配置一个

用于控制信道的固定发射机（图 8-14 中未画出）和一个用于发送数据的可调波长发射机。其优点是上行波长动态分配，能够支持更多的 ONU，提高了波长信道的利用率。但这种 ONU 成本太高，不宜推广使用。

在图 8-14 中，为了清晰起见，图中只给出了 PON 的上行部分。在 ONU 中，使用波长可调 LD（见问 4-9），使其工作在不同的波长，可调激光器工作在特定波长，但可通过电调谐、温度调谐或机械调谐使其波长改变。如果网络中的分路器只是 WDM 器件，例如 AWG，WDM 器件的通道间隔和 LD 的调谐范围将决定系统可支持的 ONU 数量。如果在光分配节点中采用宽带分路器/合路器，在 OLT 中心局采用更多波长选择的滤波器，则可以有比较多的接入通道，但是必须考虑可能的功率预算。另外，可调激光器系统比传统 PON 系统更复杂，价格也较为高昂，因此在目前的 WDM-PON 系统中一般不采用。

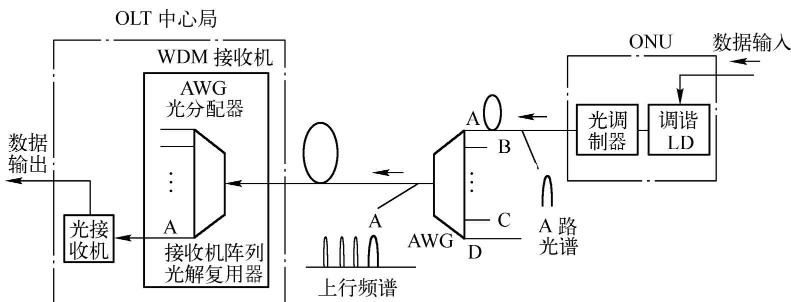


图 8-14　ONU 波长可调 LD WDM-PON 上行部分

8-20　如何构成 ONU 无色 WDM-PON？

基于无色 ONU 的技术方案是 WDM-PON 系统的主流，根据使用器件的不同，可分为宽谱光源 ONU 和无光源 ONU。

图 8-15a 表示 ONU 中采用宽谱光源的 WDM-PON 系统。在这种系统中，ONU 内有一个宽谱光源，例如超发光二极管（SLED），它发出的光进入 WDM 器件（薄膜滤波器或者 AWG）的一个端口，该器件对信号进行光谱分割，只允许特定波长的光信号通过并传输到

位于中心局的 OLT。尽管所有 ONU 都采用同一个光源，但由于它们连接在 AWG WDM 合波器的不同端口上，所以每个 ONU 分切到的是同一个光源的不同光谱，即每个通道（ONU）得到的是不同的波长信号。宽谱光源可采用 SLED、自发辐射 EDFA 光放大器（ASE-EDFA）和自发辐射反射半导体光放大器（ASE-RSOA）等。

另一种方案是在 ONU 处无光源，系统中所有 ONU 共用的宽谱光源置于 OLT 处，并通过 AWG2 进行光谱分割，然后向每个 ONU 提供波长互不相同的光信号，而 ONU 直接对此光信号进行调制，以产生上行信号，如图 8-15b 所示。根据上行光信号的路径，该方案也叫做基于反射的无色 ONU。根据所采用的反射器件的不同，又有多种技术方案。常用的反射调制器有反射式半导体光放大器（RSOA）和反射式电吸收波导调制器（REAM）等，其中 RSOA 对 OLT 发送过来的光信号既调制又放大。在这种方案中，OLT 宽谱光源发出的光经 AWG2 分波后提供给不同的 ONU 作为上行光源，因此没有光信号的浪费。宽谱光源称做种子光源。

a)

b)

图 8-15　ONU 无色 WDM-PON 系统

a）ONU 宽谱光源 WDM-PON 系统的上行部分　b）ONU 中无光源 WDM-PON

8-21　与 PS-PON 比较 WDM-PON 技术上有什么优点?

与 TDM-PON（PS-PON）相比，WDM-PON 系统具有以下的一些优点：第一，WDM-PON 系统的信息安全性好，在 TDM-PON 系统中，由于下行数据采用广播式发送给与此相连接的所有 ONU，为了信息安全，必须对下行信号进行加密，这在 G.983.1 建议中已经作了规定，尽管如此，它的保密性也不如单独使用一个接收波长的 WDM-PON 系统；第二，OLT 由于是多波长发射和接收，工作速率与 ONU 的数目无关，可与 ONU 的工作速率相同；第三，电路实现相对较简单，因为不需要难度很大的高速突发光接收机；第四，波分复用/解复用器的插入损耗要比光分配器的小，在激光器输出功率相等的情况下，传输距离更远，网络覆盖范围更大。

8-22　什么是 WDM/TDM 混合无源光网络?

在 WDM-PON 和 PS-PON 之间有一种折中的方案，那就是下行传输采用 WDM-PON，上行传输采用功率分配（PS）的 TDMA-PON，如图 8-16 所示。这种方案称为 WDM/TDM 混合无源光网络，它结合了波分复用无源光网络和时分复用无源光网络的优点，非常适合从时分无源光网络到波分无源光网络过渡的部署。这种混合网络实际上在网络容量和实现成本两个方面进行了折中，既具有 TDM-PON 中无源光功率分配所带来的优点，又具有 WDM-PON 波长路由选择所带来的优点，实现了相对较低的用户成本，并在维持较高用户使用带宽的前提下，增加了网络容量扩展的弹性。

图 8-16 是一种双纤结构，下行是 1 550 nm 的 DWDM，用 AWG 对 OLT 发送来的 WDM 信号解复用，然后分别馈送各波长信号到相应的 ONU。上行采用 1 310 nm 的 TDMA，所以 OLT 接收机要采用突发模式光接收机。

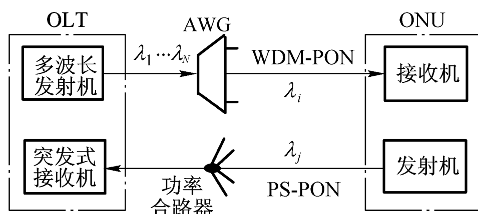


图 8-16　复合 WDM-PON

8-23　什么是正交频分复用 PON（OFDM-PON）?

下一代光接入网要求同时分配多种业务给多个用户，这些业务包括历史上遗留下来的 T1/E1 业务、蜂窝基站信号等。现行的 EPON 和 GPON 结构需要复杂的调度算法和成帧技术，以便支持各种业务。这些 TDM-PON 的性能对分组传输的延迟很敏感，很容易受到通过同一链路的其他数据流量的影响。另外，WDM-PON 可以透明地分发多种业务，因为每种业务可以使用专用的波长，然而多个波长可能要求多个收发机和阵列波导光栅（AWG）或光滤波器，以便分配波长给相应的接收机，这样就增加了系统费用和成本。此外，WDM-PON 也缺乏在不同业务间动态分配资源的灵活性。为了克服以上 PON 的缺陷，科学家们就提出 OFDM-PON。

在这种 OFDM-PON 应用中，OFDMA 作为一种多址接入技术，可以采用动态分配不同的副载波给多个用户，从而可以同时实现时域和频域的资源分配，透明地支持各种业务，动态地在这些业务中进行带宽分配。OFDM-PON 可以与 TDM-PON 结合，提供附加的资源管理功能，例如在时域，PON 可以提供数据的突发流量；在频域，PON 可以提供精细的信道调度。

OFDM-PON 的工作原理如图 8-17 所示，OFDMA 混合采用了 OFDM 技术和 TDMA 技术，这里 OFDM 的副载波在不同的 TDMA 时隙中动态分配给不同的业务。已调数据流在频域相互正交，这就是说，消除了副载波间的相互串扰。借助去掉一些副载波，可以把传输通道插入 OFDMA 信号带宽中，这样就可以用来独立发送任何其他业务。

在 OFDM-PON 中，整个带宽被分割成相互正交的副载波，给每个 ONU 分配一个或多个副载波的子信道。一些副载波可用于指定的业务，像光纤传输射频信号（RoF）用于无线基站。图 8-17 表示传输通道用于多种业务的 OFDM-PON，用白色和浅灰色表示的专用副载波用于两个透明通道，一个用于商业区的 TDM（T1/E1）业务，一个用于移动基站的射频信号。T1/E1 业务和射频信号用来直接驱动光调制器，而无需进行任何处理。每个透明通道的副载波数量取决于业务要求的带宽。余下的副载波（用深灰色表示）分配给分组 IP 业务，由 ONU_1 和 ONU_3 在频域和时域共用。副载波和时隙的分配由 OLT 控制。

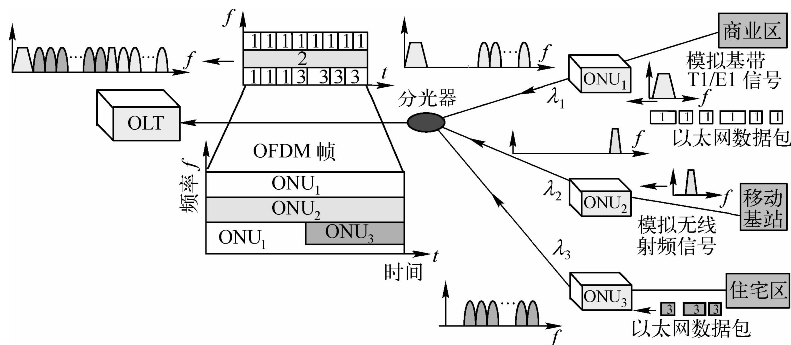


图 8-17　OFDM-PON 上行传输和成帧的原理示意图

在上行方向，每一个 ONU 将数据或信号映射（调制）到指定的副载波（集）或通道上，同时使所有其他的 ONU 的副载波集都不工作，从而就构成了一个 OFDM 帧。然后，ONU 中的信号直接调制不同波长的 LD，以便转换该帧成光 OFDM 符号。LD 的波长是由 OLT 预先确定通知 ONU 的。多个 ONU 发送来的光 OFDM 符号在分光器中复合，这样就构成了一个 OFDM 帧，经光纤送到 OLT，在这里被 OLT 接收机中的一个光探测器检测。所有通过透明通道传输的模拟信号可以很容易被电带通滤波器分离出来，由于其频谱的正交特性，其他 ONU 的干扰可以减小到最小。每个 ONU 要求一个互不相同的波长，以便避免拍频噪声。

在下行方向，OLT 用预留的一些副载波作为透明的通道，并且

将基于分组的数据，根据频域和时域的调度，封装在剩下的副载波和时隙中。OFDM 帧和其他模拟信号被电子合成器混合，以便驱动光调制器。当混合信号到达这些 ONU 时，每个 ONU 从有关的副载波（集）、通道和时隙中，取出属于自己的数据或信号。

在图 8-17 表示的 OFDM-PON 中，由一个或几个副载波组成的专用子信道变成一个透明的通道，用来分发任意的模拟或数字信号，不管是电路交换系统，还是分组交换系统。由此看来，OFDM-PON 是一个透明的平台，可以传输各种制式的信息；同时还可以提供未来可能出现的任何扩展应用。

8-24　什么是射频信号光纤传输（RoF）系统?

RoF 系统是射频信号光纤传输的缩写，为了利用光纤低损宽带的优点，人们就用光纤分配射频信号（RoF）给用户。微波副载波调制（SCM）光纤传输系统就是一种 RoF 系统。为了增加用户数据传输速率，使现在的无线通信系统在常规的射频（RF）频段上工作，毫米波段的 RoF 系统受到人们的极大关注。若用 DWDM 技术，还可以同时将模拟 RoF 信号和数字信号传输到每个家庭。

8-25　如何将光正交频分复用（O-OFDM）技术应用到 RoF 无线通信网络中?

正交频分复用（OFDM）由于有较高的频谱利用率和抗多径干扰的能力，已广泛应用于无线、有线和广播通信中，已被多个标准化组织所采纳，如无线局域网（LAN，也称 WiFi）、数字用户线（DSL）、全球微波互联接入（WiMax 和 IEEE 802.16）以及数字视频音频广播标准等。

为了降低 WiMax 和其他无线网络的开发和维护费用，同时提供功耗低和带宽大的性能，人们提出了射频信号光纤传输（RoF）无线通信系统的建议。在 RoF 系统中，用光纤将正交频分复用（OFDM）射频信号从中心站传送到远端基站，基站将光信号转变成 OFDM 射频信号，然后用天线广播发送到终端用户，如图 8-18 所示。

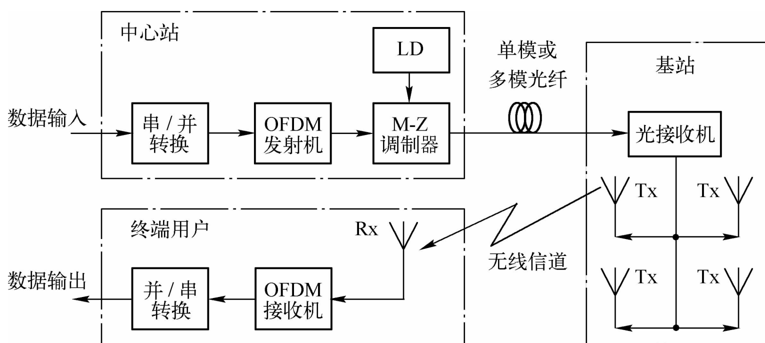


图 8-18　OFDM 在射频信号光纤传输（RoF）无线通信网络中的应用

在 RoF 系统中，信号可能由于模式色散（使用多模光纤时）或色度色散（使用单模光纤时）、基站信号分量缺失和多径无线衰落而产生失真。但是，只要循环前缀的时长大于多径传输和色散引起的传输延迟，这些失真就可以避免，RoF 系统的性能就不会受到影响。

RoF 系统的应用范围很广，几种可能的应用是：

（1）在现在的蜂窝移动系统中，用于连接移动电话交换局和基站。

（2）在 WiMax 系统中，用于连接 WiMax 基站和远端的天线单元，可扩展 WiMax 的覆盖范围，提高其可靠性。

（3）在光纤同轴混合网络（HFC）和光纤到家（FTTH）的应用中，使用 RoF 系统可降低室内系统的安装和维护费用。

8-26　什么是光纤/电缆混合（HFC）网？

信源前端到小区使用光缆，小区到用户使用同轴电缆传输的网络叫光纤/电缆混合网（HFC），如图 8-19 所示。它是一种典型的频分复用光纤通信系统，主要任务是把多频道模拟视频信号以 FDM 技术复用在一起，通过光纤和电缆以广播的形式传送到千家万户，未来目标是从单向发送模拟视频信号逐步向双向数字网络演进。

HFC 系统一般可分为前端、干线和分支等三个部分，如图 8-19 所示。

前端部分包括电视接收天线、卫星电视接收设备、甚高频-超高频（UHF-VHF）变换器和自办节目设备等部件。

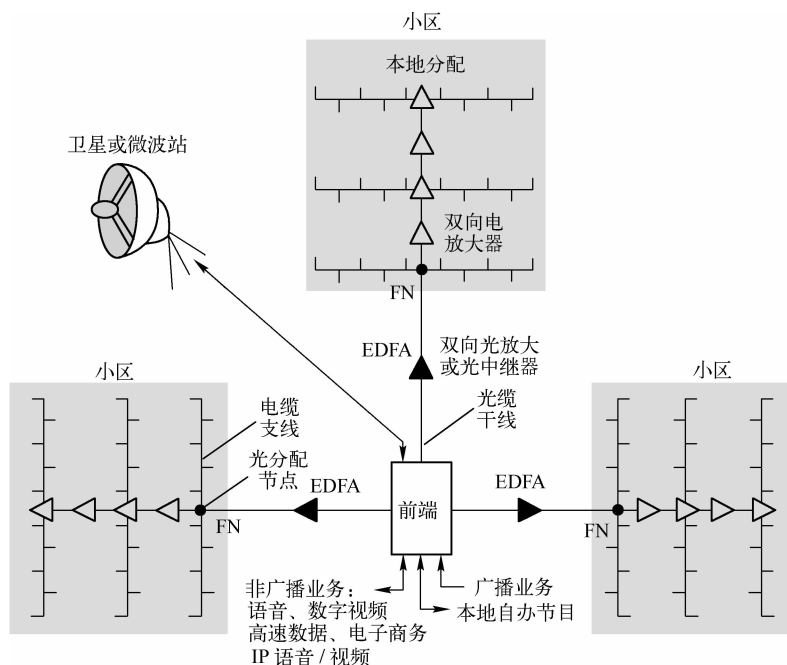


图 8-19　光纤/电缆混合（HFC）有线电视网络结构

在设计 HFC 系统时，把一个城市或地区划分为若干个小区，每个小区设一个光节点，每个光节点可向几千个用户提供服务。从前端经一条（或多条）光纤直接传送已调制光信号到每个光节点，或者通过无源光网络（PON）将光信号分配到各个光节点。在节点处，光信号经光探测器转换为射频信号，再经同轴电缆和 3 ~ 4 级小型电放大器分配信号到用户。级联的电放大器最多不超过 5 级。无论是长距离还是短距离，光路的衰减都设计为 10 ~ 12 dB，所以 HFC 每条光路和光节点后边的支线指标都相同，TV 信号在光路的失真甚微，支线上的放大器级联数很少，因而由此造成的噪声、频响不平坦和非线性失真积累也较少，因此 HFC 网络与同轴电缆网络相比，性能指标要高得多。

如果要传输的信号是数字信号，则用正交幅度调制（QAM）或正交相移键控调制（QPSK）将数字信号转变为模拟信号，再以频分复用（FDM）的方式与模拟信号混合在一起，如图 8-20 所示，然后

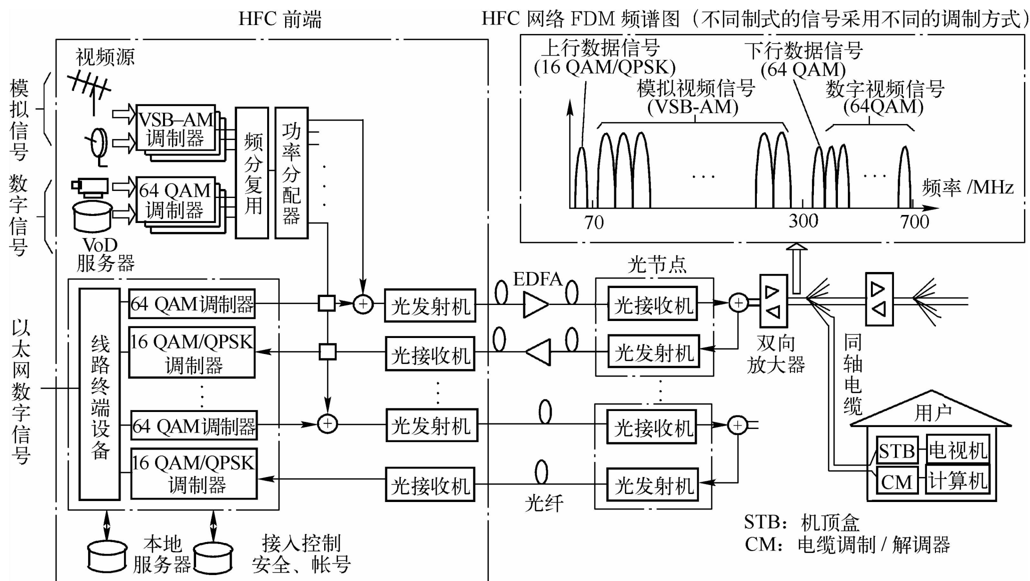


图 8-20　HFC 系统的构成

去调制激光器，经干线光纤和支线同轴电缆传输后，在接收端进行解调，恢复为原来的信号。HFC 网络所提供的业务，除电话、模拟广播电视信号外，还可逐步开展窄带 ISDN 业务、高速数据通信业务、会议电视、数字视频点播（VoD）和各种数据信息业务。这种方式既能提供宽带业务所需的带宽，又能降低建设网络的开支。

大多数光纤通信系统是数字系统，但是用于电视分配系统的 HFC 例外，它是模拟系统。现有的 HFC 网络，对于短距离传输，使用残留边带幅度调制（VSB-AM）频分复用（FDM）技术；对于长距离传输，使用副载波调频（SCM-FM）技术。对于数字视频信号，可以将数字视频基带信号进行 QPSK 或 QAM 载波调制变成模拟信号，分别用不同的副载波载运，再使用 FDM 或 SCM 复用技术复用在一起，如图 8-20 所示。经 FDM 或 SCM 复用后的射频信号或微波信号再对激光器进行直接强度（IM）调制，如果半导体激光器线性特性好，输入电信号就可以变成不失真的输出光信号，经光纤传输后在接收端采用直接检测（DD）再变成电信号，然后再解调还原成原基带信号。所以这种系统称为光强度调制/直接检测（IM/DD）系统。

为了提供双向数据通信和支持电话业务，必须增加电缆调制解调器（Cable Modem，CM）。Cable Modem 是一种可以通过有线电视网络进行高速数据接入的装置。它一般有两个接口，一个用来连接室内墙上的有线电视端口，另一个与计算机相连，以便将数据终端设备（计算机）连接到有线电视网，来进行数据通信和访问 Internet。Cable Modem 不仅有将数字信号调制到射频上的调制功能和将射频信号携带的数字信号解调出来的解调功能，而且还有电视接收调谐、加密/解密和协议适配等功能。它还可能是一个桥接器、路由器、网络控制器或集线器。Cable Modem 把上行数字信号转换成类似于电视信号的模拟射频信号，以便在有线电视网上传送；而把下行射频模拟信号转换为数字信号，以便计算机处理。

Cable Modem 可分为外置式、内置式和交互式机顶盒。外置 Cable Modem 的外形像小盒子，通过网卡连接计算机，所以连接 Cable Modem 前需要给计算机添置一块网卡，可以支持局域网上的多台计算机同时上网。Cable Modem 支持大多数操作系统和硬件平台。

内置 Cable Modem 是一块 PCI 插卡，这是最便宜的解决方案，不过只能在台式计算机上使用，在笔记本电脑上无法使用。

交互式机顶盒（STB）是 Cable Modem 的一种应用，它通过使用数字电视编码（DVB）技术，为交互式机顶盒提供一个回路，使用户可以直接在电视机屏幕上访问网络，收发 E-mail 等。

使用 DFB 激光器，结合使用外调制器和掺铒光纤放大器（EDFA），可扩展传输距离。通过较为复杂的预失真和降噪技术也可以提高系统性能。基于上述因素，线性光波系统足以能把 80 路模拟视频外加 1 路宽带数字 RF 信号传输 60 km 以上，其性能接近理论极限。

HFC 采用副载波频分复用方式，将各种图像、数据和声音信号通过调制/解调器调制在高频载波上。如是模拟电视信号，则每个载波的带宽为 8 MHz（中国），多个载波经 FDM 复用后同时在传输线路上传输，如图 8-21 所示。合理的频谱安排十分重要，既要照顾到历史和现状，又要考虑到未来的发展，但目前还没有统一的标准。通常，低频端的 5 ~ 65 MHz 安排给上行信道，即回传信道，主要用于传输电话信号、状态监视信号和 VoD 信令。85 ~ 1 000 MHz 频段为下行信道，其中 85 ~ 290 MHz 用来传输现有的模拟 CATV 信号，每一路的带宽为 8 MHz，约可传输 25 个频道的节目（(290 − 85)/8 ≈ 25）。290 ~ 700 MHz 频段允许用来传输数字电视节目。如数字电视信号采用 64 QAM调制，调制效率为 4.5 bit/(s · Hz)，利用 MPEG-2 压缩编码，每信道速率为 4 Mbit/s，因此每个 8 MHz 模拟 CATV 信道可传输的数字信道数为 8 × 4.5/4 = 9。那么 290 ~ 700 MHz 频段传输的数字电视节目数为(700 − 290)/8 × 9 ≈ 561。

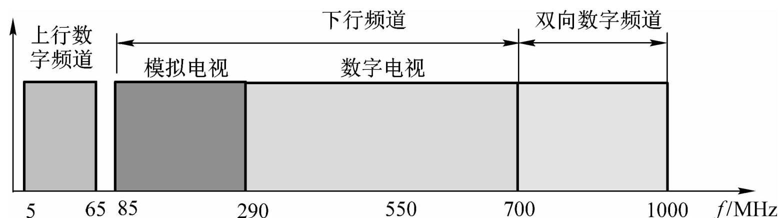


图 8-21　典型的 HFC 频谱安排图

高端的700～1 000 MHz频段将来可用于传输各种双向通信业务，如VoD等。

8-27 什么是ADSL接入？

电信公司为了有效利用现有电话线资源，提高接入网的速度和带宽，以便获得更多的利润，并满足用户对高速数据和宽带业务的需求，开发了数字用户线（xDSL）技术。xDSL有高速数字用户线（HDSL）、非对称数字用户线（ADSL）和甚高频数字用户线（VDSL）之分。

ADSL除提供T1/E1业务外，还能提供普通电话业务、IP业务和点播电视业务，适用于家庭使用。最大特点是无须改动现有铜缆网络设施就能提供宽带业务。所以1998年10月ITU-T提出了G.992.1建议，规定了全速率的ADSL技术规范。随后，又推出G.992.2建议，规定了用户端不用分离器的ADSL技术规范（G.Lite），其目的是降低设备安装的复杂性和成本。

图8-22表示用于异步传输模式（ATM）的ADSL系统的构成，由图可见，ADSL分离/合路器由高通滤波器和低通滤波器组成，完成低频电话信号和宽带数据和视频信号的分离和合路。在下行方向，ADSL分离/合路器将电话信号和经过ADSL局端收发器处理的宽带业务信号复合在一起，通过同一对电话线传输到用户端的ADSL分离/合路器，在这里电话信号由低通滤波器取出送到电话端机，而宽带业务信号由高通滤波器取出送到ADSL远端收发器。在上行方向，使用ADSL分离器，将宽带信号和窄带信号复合在一起，通过电话线传到电话局后，在通过信号合路/分离器时，如果是语音信号就传到交换机上，如果是数字信号就接入Internet。ITU－T G.992.1除规范了ATM的ADSL外，还规范了一种用于同步传输模式（STM）的ADSL。

由于频率越高，信号在线路上的损耗越大。ADSL要在长距离的双绞线传输大量的数据信号，将采用数字信号处理和调制技术把大量的信息压缩后，分信道在双绞线上传送。为了建立多个信道，AD-

SL 对电话线进行频带划分（FDM）。将 0～4 kHz 的频带用做电话信号传送，剩余频带，将其划分为一个互不重叠的频带，一段用于上行信道，一段用于下行信道，如图 8-23 所示。下行信道由一个或多个高速信道加入一个或多个低速信道以时分方式组成，上行信道由相应的低速信道也以时分复用方式组成。

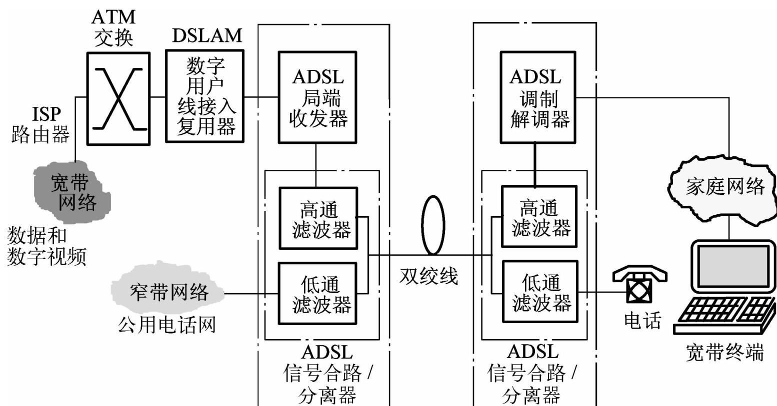


图 8-22　ADSL 系统构成

ADSL 采用频分复用（FDM）方式，载波间距是 4. 3125 kHz，如图 8-23 所示。音频段占 0～4 kHz，用于传输普通电话业务（POTS）。高频数据段占用 25 kHz～1. 1 MHz，其中 25～138 kHz 用于上行传输。传输速度下行快、上行慢，正好满足大多数应用场合，同时也可以大大减小近端串音。下行传输速率与距离有关，一般来说，随着传输距离的增加，传输速率会下降。对于 3 km 以内的传输距离，下行传输速率可以达到 8 Mbit/s；当 6 km 时速率降低到 1. 5 Mbit/s。上行速率通常为 640 kbit/s。

ADSL 的最大特点是无需改动现有铜缆网络设施就能提供宽带业务，其主要缺点是对线路的苛刻要求，目前国内只有少部分双绞线对可以开通 ADSL 业务。与同轴电缆和光纤相比，双绞线的带宽毕竟是有限的。因此，ADSL 反反是近期接入的一种过渡性方式，随着光纤看，ADSL 终究将被淘汰。

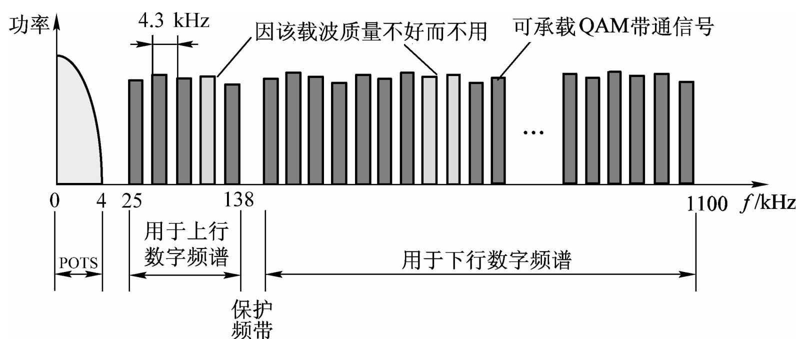


图 8-23　基于 DMT 的 ADSL 系统的传输频谱

8-28　如何将 SDH 用于接入网?

SDH 已在核心网中得到广泛应用，如果将 SDH 的功能和接口靠近用户，则可把 SDH 在技术上的优势带进接入网领域。在接入网中应用 SDH 的主要优势在于：对于要求可靠性和业务质量高的大型企事业用户，可以直接用 SDH 系统以点到点或环形拓扑形式与用户相连；可以增加传输带宽，改进网管能力，简化维护工作，降低运行维护成本。

当然，考虑到接入网对成本的高度敏感性和运行环境的恶劣性，适用于接入网的 SDH 设备必须是体积小、成本低和功耗小的系统。目前已有专门用于接入网的 SDH 设备。

但是，传统的 SDH 设备不适合 B-ISDN 使用。因为在多媒体的双向应用中，上下行的传输速率是不对称的，即所需的下行速率和带宽远大于上行速率和带宽，但是 SDH 系统只传输恒定的比特率业务，而且上行传输速率和带宽总是与下行的相同，它并不能因为用户不需要而减小，实际上，在用户没有足够的信元填充一帧时，它就用空闲信元填充，所以传统 SDH 设备用于接入网，对上行带宽的使用是一种浪费，对下行带宽又不能动态分配。

图 8-24 表示 SDH 用于接入网的两个例子。

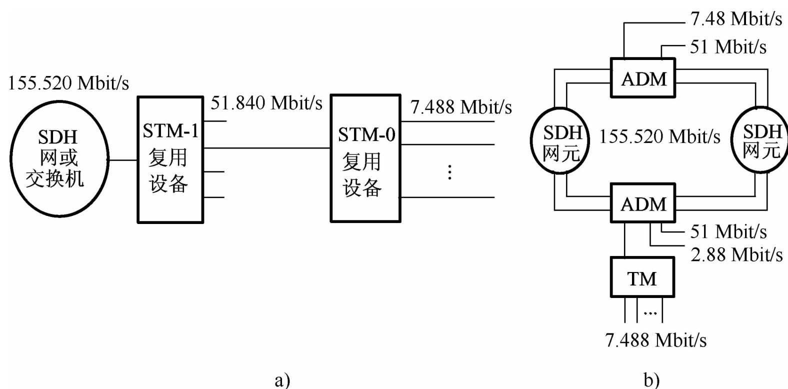


图 8-24　SDH 用于接入网

a）树形结构　b）环形结构

8-29　什么是大气光通信传输系统?

早在 20 世纪 60 年代光纤通信出现之前，自由空间光通信的研究就已开始。大气由气体、水蒸气、污染物和其他化学粒子组成。大气作为传输媒体，和光纤信道一样也存在吸收和散射，产生功率损耗和波形失真。而且，大气密度和折射率随气候和温度的变化更为明显，所以引起大气沿传输路径的透光特性和传输损耗在随时变化。比如在非常晴朗的天气，能见度达到 50 ~ 150 km，衰减系数为 0. 144 ~ 0. 03 dB/km；但在浓雾天气时，能见度只有 70 ~ 250 m，衰减系数竟然达到 220 ~ 58 dB/km。另外，光通过透明大气层时，有些波长的光被吸收，只有某些波长的光，如 0. 85 μm、1. 3 μm 和 1. 55 μm 波段的光才具有最大的透射率。因此大气光通信受天气的影响很大，传输容量一直都很小，距离也很短，而且要求收发端天线的准精度很高，所以在民用通信网中几乎没有使用。无线光通信的研究和应用仅局限于星际通信和国防通信领域。

但是近年来，由于光放大器的成熟和技术的进步，大气激光通信走出了低谷，又受到人们的重视。目前已有多种大气激光通信设备，图 8-25 表示一般大气激光通信系统的构成，其中值得一提的是工作窗口为 1. 55 μm 波长、采用 4 × 2. 5 Gbit/s 密集波分复用

（DWDM）技术的设备。这一系统的关键技术是采用多径发射天线以解决对准困难，使用 EDFA 放大器来补偿光通道损耗。在光发射端，LD 的输出光被 EDFA 放大后，经单模光纤分支器将光信号同时加到发射光学望远镜的孔径上，每个孔径偏移 0.5 毫弧度（mrad），在大气中传输 4 km 后到达接收端时的光斑直径为 2.2 m。光接收终端是一个改进了的施密特－卡塞格伦望远镜，自由空间光信号进入该望远镜后被聚焦到芯径为 62.5 μm 的多模光纤上。

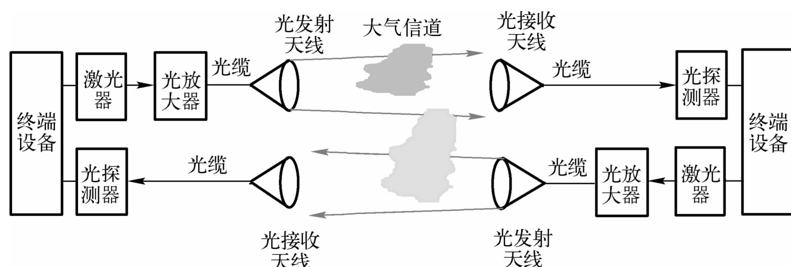


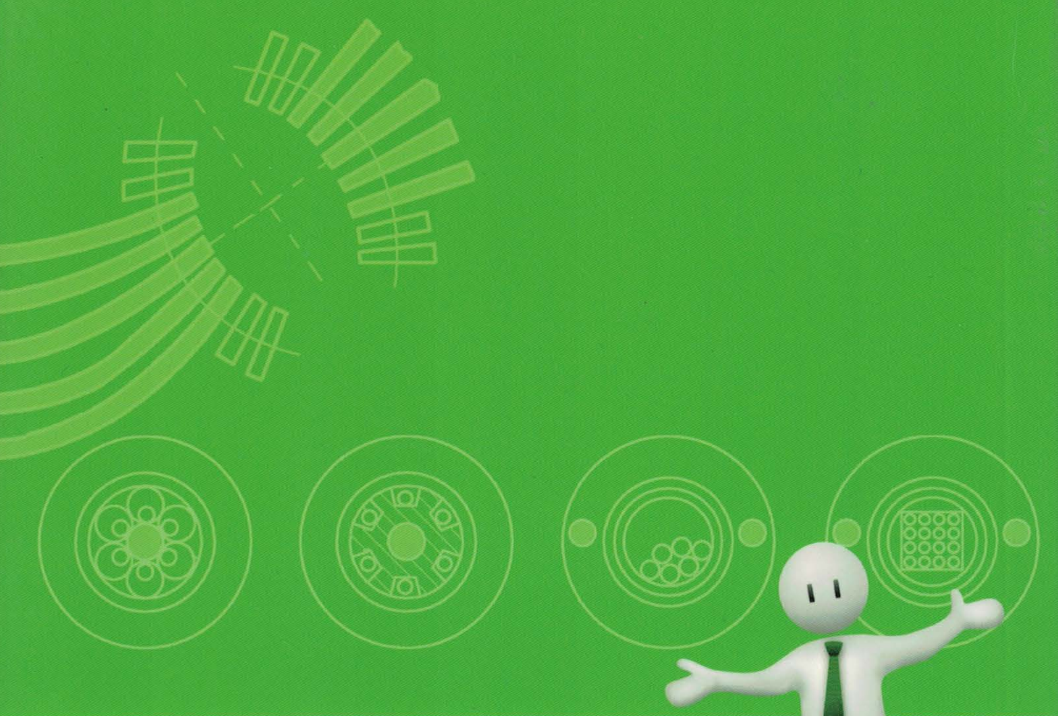
图 8-25　大气激光通信系统

附　　录

缩　略　语

ADM	分插复用器	A/D	模拟/数字转换
ADSL	非对称数字用户线		
APD	雪崩光敏二极管	APON	ATM PON
AM	幅度调制	ASK	幅移键控
ASE-RSOA	自发辐射反射半导体光放大器		
ASON	自动交换光网络	ATM	异步传送模式
AWG	阵列波导光栅	BER	比特误码率
BISDN	宽带综合业务接入网		
CDM	码分复用	CDMA	码分多址接入
CM(Cable Modem)	电缆调制解调器	DVB	数字电视编码
CWDM	粗波分复用	DFB	分布反馈激光器
DQPSK	正交相移键控	DRA	分布光纤拉曼放大器
DSP	数字信号处理	DWDM	密集波分复用
DXC	数字交叉连接设备	EDFA	掺铒光纤放大器
EPON	以太网无源光网络	FDM	频分复用
F-P	法布里－珀罗		
FSAN	全业务接入网	FTTH	光纤到家
GEM	GPON 封装	GI	渐变多模光纤
GMPLS	通用多协议标记交换	GPON	千兆比特 PON
HFC	光纤同轴电缆混合网络		
IM/DD	强度调制－直接检测	IP	互联网协议
ISI	码间干扰	LD	激光器
LED	发光二极管	LAN	局域网
MAC	媒质接入控制协议	MAN	城域网
MEMS	微机电系统	MIMO	多入多出

MPLS	多协议标签交换	M-Z	马赫－曾德尔
OADM	光分插复用器		
OCDM	光码分复用	ODN	光分配网
OFDM-PON	正交频分复用 PON	OFDMA	正交频分多址接入
OFDM	正交频分复用	OLA	光线路放大器
OLT	光线路终端	OSI	开放系统互联
OLA	光线路放大器	ONU	光网络单元
O-OFDM	光正交频分复用	OTM	光终端复用器
OTDM	光时分复用	OTN	光传送网
OTM	光终端复用器	OXC	光交叉连接器
PCM	脉冲编码调制	PDH	准同步数字制式
PIN	一种光敏探测器		
PM-DQPSK	偏振复用差分正交相移键控		
PON	无源光网络	PS-PON	功率分配 PON
QAM	正交幅度调制	QoS	服务质量
QPSK	正交相移键控调制		
REAM	反射式电吸收波导调制器		
ROADM	重构的 OADM	RoF	射频信号光纤传输
RSOA	反射式半导体光放大器		
SCMA	副载波多址接入	SCM	微波副载波复用
SDH	同步数字制式	SLED	超发光二极管
SNR	信噪比	SNMP	简单网管协议
SOA	半导体光放大器	STB	机顶盒
STM	同步传输模式	TCP	传输控制协议
TDM	时分复用	TDMA	时分多址接入
TDM-PON	时分复用 PON	TM	终端复用器
TW-PD	行波光探测器	VC	虚信道
VoD	数字视频点播	VP	虚通道
WAN	宽域网	WDM-PON	波分复用 PON
WDMA	波分多址接入	WDM	波分复用
WG-PD	波导光探测器	WiFi LAN	无线局域网
WiMA	全球微波互联接入	VSB-AM	残留边带幅度调制
WSS	波长选择交换	WWDM	宽波分复用





GUANGXIAN TONGXIN
RUMEN 130 WEN

上架指导 通信技术

ISBN 978-7-111-37800-6
策划编辑：李馨馨 / 封面设计：鞠杨

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

定价：20.00元

